

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření ztrát na T-kusu při změnách směru proudění na vodní trati

Measuring Losses of T-piece During Changes in Direction of Flow on Water Line

Student:

Lukáš Lazorišák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student:

Lukáš Lazorišák

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Měření ztrát na T-kusu při změnách směru proudění na vodní trati
Measuring Losses of T-piece During Changes in Direction of Flow on
Water Line

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teorie místních ztrát při proudění skutečné kapaliny.
2. Měření difference tlaku a průtoku vody. Metody měření a měřidla k měření difference tlaku a průtoku vody.
3. Návrh experimentální měřicí tratě k měření charakteristiky T-kusu na vodní trati. Umístění měřidel a vyhodnocení měřených veličin.
4. Provedení měření pro různé zapojení T-kusu na vodní trati (různé směry proudění).
5. Vyhodnocení výsledků měření charakteristiky T-kusu (grafy, tabulky).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin - učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2007, 260 s. ISBN 978-80-248-1508-4. <http://vyuka.fs.vsb.cz/course/category.php?id=10>
2. *Návod k měření místních ztrát*: <http://www.338.vsb.cz/PDF/SKRIPTA01.pdf>
3. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995, 155 s.
4. JENČÍK, J. KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha. SNTL Praha. 1982. 580 s.
5. NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha. SNTL Praha, 1987. 354 s.
6. NOSKIEVIČ, J. JANALÍK, J. RÝC, Z. ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin příručka pro laboratorní cvičení*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1987, 152 s. ISBN-80-03-00308-3.
7. VINOPAL, S. KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha. SNTL Praha, 1963. 650 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2014

Lukáš Zaslavský

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5.2014



podpis

Lukáš Lazorišák

Petrovice u Karviné 3

735 72

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D. za jeho ochotu, pomoc a rady při vypracovávání mé bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LAZORIŠÁK, L. *Měření ztrát na T-kusu při změnách směru proudění na vodní trati: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 48 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Tato bakalářská práce se zabývá měřením ztrát na T-kusu při změnách směru proudění na vodní trati. V úvodu jsou definovány druhy ztrát, jejich vznik, výpočet a způsoby měření tlaku a objemového průtoku. Pro realizaci měření byly navrženy experimentální měřící tratě, na kterých byly měřeny objemové průtoky a tlakové výšky. Hodnoty objemových průtoků a tlakových výšek byly nezbytnou součástí k výpočtům ztrátových součinitelů. Veškeré hodnoty byly zapsány do tabulek a vyneseny do grafů pro porovnání. V závěru je uvedeno shrnutí bakalářské práce a porovnání měření.

KLÍČOVÁ SLOVA:

T-kus, Sací tvarovka, Ztrátový součinitel, Objemový průtok, Hydrostatický tlak, Experimentální měřící trať

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

LAZORIŠÁK, L. *Measuring Losses of T-piece During Changes in Direction of Flow on Water Line: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2014, 48 p. Thesis head: Bojko, M.

This bachelor thesis deals with the measuring of the T-piece during changes in the flow direction on the water line. In the introduction the types of losses, their calculation and creation are defined, further more the ways of pressure and volume flow measuring are stated. Experimental measuring lines, where the volume flow and pressure hights were measured, had been designed for the purpose of implementation of measurements. The values of the volume flows and of pressure hights were an essential part of the calculation of the loss values. All values were put in tables and plotted on graphs for comparison. In the conclusion there is a summary of the thesis and measurement comparison.

KEY WORDS:

T-piece, Suction shaped piece, Loss coefficient, Volume flow, Hydrostatic pressure, Experimental measurement line

Obsah	strana
Seznam použitých označení veličin	9
1. Úvod	11
2. Hydraulické ztráty při proudění skutečných tekutin	13
2.1. Charakteristika třecích ztrát	14
2.2. Charakteristika místních ztrát	16
3. Metody měření veličin v hydraulice	18
3.1 Metody měření průtoku	18
3.1.1. Měření průtoku tekutin pomocí škrtícího orgánu	18
3.1.2. Plovákový průtokoměr	19
3.1.3. Rychlostní průtokoměry	20
3.1.4. Měření průtoku pomocí nezatíženého hydromotoru	21
3.2 Měření tlaku	21
3.2.1. Kapalinové tlakoměry	21
3.2.2. Tlakoměry deformační	22
4. Literární rešerše měření hydraulických ztrát na T-kusu	23
4.1 Tvarovky výtlačného typu	23
4.2 Tvarovky sacího typu	24
5. Vyhodnocení ztrátových součinitelů dle experimentu	26
6. Návrh experimentální měřicí tratě	27
6.1 Použité prvky a jejich specifikace	27
6.2 Varianty zapojení měřících tratí	29
7. Měření a vyhodnocování pro jednotlivé návrhy měřících tratí	31
7.1 Vyhodnocení první varianty měřicí tratě	31
7.2 Vyhodnocení druhé varianty měřicí tratě	39
7.3 Vyhodnocení třetí varianty měřicí tratě	41
8. Porovnání naměřených a vypočtených hodnot	44
9. Závěr	46

Použitá literatura	48
--------------------------	----

Seznam použitých označení veličin

Označení veličiny	Název veličiny	Jednotka
C	součinitel průtoku	1
F	síla	N
Q_b	objemový průtok boční větve potrubí	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_m	hmotnostní průtok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Q_p	objemový průtok přímé větve potrubí	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_V(Q)$	objemový průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	1
S	plocha (průřez)	m^2
S_b	průtoční průřez přímé větve potrubí	m^2
S_p	průtoční průřez přímé větve potrubí	m^2
V	objem	m^3
V_g	geometrický objem	m^3
Y_z	měrná ztrátová energie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
c	opravný součinitel	1
d	průměr	m
e_z	měrná ztrátová energie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
g	gravitační zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	tlaková výška	m
h_b	tlaková výška na boční větvi	m
h_p	tlaková výška na přímé větvi	m
h_z	ztrátová výška	m
h_{zm}	ztrátová výška (místní ztráty)	m
k	střední drsnost stěny potrubí	m
k_1	konstanta určená cejchováním průtokoměru	1
k_2	konstanta určená cejchováním průtokoměru	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
l	délka	m

l_e	ekvivalentní délka potrubí	m
n	otáčky	s^{-1}
p	tlak	Pa
p_a	absolutní tlak	Pa
p_0	atmosférický tlak	Pa
p_r	relativní tlak	Pa
p_z	tlaková ztráta	Pa
v	rychlost proudění	$m.s^{-1}$
v_b	rychlost proudění v boční větvi	$m.s^{-1}$
v_p	rychlost proudění v přímé větvi	$m.s^{-1}$
β	poměr průměrů	1
δ	úhel	°
ε	poměrná relativní drsnost	1
ε_e	součinitel expanze	1
ζ_b	ztrátový součinitel místního odporu boční větve potrubí	1
ζ_m	ztrátový součinitel místního odporu	1
ζ_p	ztrátový součinitel místního odporu přímé větve potrubí	1
λ	třecí součinitel	1
ν	kinematická viskozita	$m^2.s^{-1}$
π	Ludolfovo číslo ($\pi = 3,141592592654$)	1
ρ	hustota	$kg.m^{-3}$
Δp	diferenční tlak	Pa

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je měření hydraulických ztrát na tvarovce typu T, konkrétně s kolmou přípojkou. Tyto tvarovky se rozdělují do dvou skupin: pokud se díky tvarovce proudy rozdělují, jedná se o tvarovku výtlačného typu, pokud se proudy naopak spojují, jedná se o tvarovku typu sacího. V této práci se budu zabývat měřením hydraulických ztrát pouze na tvarovce sacího typu. Hydraulickým ztrátám rozumíme úbytek energie proudící tekutiny, vlivem např. spojení proudů nebo jejich rozdělení, což je u tvarovek tohoto typu naprosto typickým jevem.

První část bakalářské práce obsahuje rešerši týkající se hydraulických ztrát jak třecích, tak místních. V těchto kapitolách jsou popsány druhy výskytu ztrát, dále faktory ovlivňující hydraulické ztráty, vztahy pro výpočty měrné ztrátové energie, vztah pro výpočet Reynoldsova čísla a také vztahy pro výpočty ztrátových součinitelů. V dalších kapitolách jsou uvedeny způsoby měření veličin v hydraulice a to především měření objemového průtoku a tlaku, prvky pomocí kterých lze tyto veličiny měřit a dále vztahy pro výpočet těchto veličin.

V druhé části práce jsou uvedeny návrhy experimentálních tratí se specifikací použitých prvků, jako jsou např.: čerpadlo, indukční průtokoměr, tvarovka typu T, nádrž, U-trubice a kulové kohouty sloužící k regulaci průtoku. Dále je v práci obsaženo vyhodnocování měření a postup výpočtu ztrátových součinitelů, které jsou pro lepší přehlednost výsledků vyneseny do grafů.

První experimentální trať byla navržena s účelem, aby objemový průtok mohl být regulován jak na hlavním kulovém kohoutu, tak na dvou kulových kohoutech každé větve tvarovky zvlášť. Na této vodní trati proběhly celkem tři měření.

Druhá experimentální trať byla navržena a zhotovena obdobně jako první varianta s rozdílem, že na této trati již není možno regulovat průtok na dvou kulových kohoutech každé větve zvlášť, ale pouze na jednom a to na hlavním. Na této měřicí vodní trati bylo provedeno pouze jedno měření.

Třetí varianta experimentální tratě je shodná s druhou variantou, co se týče způsobu regulace objemového průtoku. Liší se zásadně ve spojení proudů v tvarovce. V prvních variantách se proudy spojovaly kolmo, kde vždy byla jednou vstupní větví přípojka a druhou přímá větev. U této varianty se proudy spojují proti sobě v přímé větvi a odpadní částí je kolmá přípojka (odbočka). Na této experimentální trati bylo provedeno rovněž jedno měření.

Na všech variantách experimentálních tratí byly použity stejné prvky.

V průběhu měření byl měřen jak objemový průtok celé tratě, tak objemový průtok na jedné z rozdělených větví, které vedou do tvarovky. Dále byly měřeny tlakové výšky, pomocí U-trubice, před každým vstupem do T-kusu. Z naměřených hodnot průtoků byly pomocí vztahů z literatur [3] a [10] vypočítány ztrátové součinitele dle teorie a na základě naměřených hodnot na experimentální měřící trati. Hodnoty z měření byly následně porovnány s literaturou Hydraulika průmyslových armatur od autorů V. Koláře a S. Vinopala [3] a mezi sebou. Měření probíhalo v laboratoři Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, v laboratoři E306, Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení.

2. Hydraulické ztráty při proudění skutečných tekutin

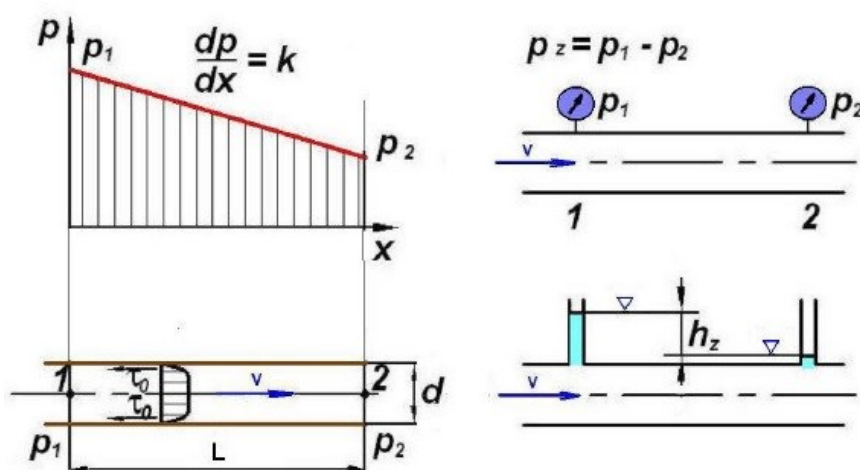
Hydraulické ztráty jsou síly působící na částice tekutin proti jejich pohybu. Vznikají při proudění skutečných tekutin vlivem viskozity a vznikají především působením vzájemnou třecí silou částic při proudění a při různých rychlostech a třením samotné tekutiny o stěny zařízení [1].

Při turbulentním proudění ($Re > Re_k$) dochází mezi jednotlivými vrstvami rozložených rychlostí k výměně energie, což zvyšuje hydraulické ztráty. Tyto ztráty jsou definovány jako ztráty třením, které závisí na délce potrubí a vedení. Součinitel tření nebo také součinitel třecího odporu je přímo úměrný délce potrubí [1].

Dalším druhem hydraulické ztráty, která vzniká při odtržení proudu od stěn, se nazývá místní ztráta. Mezi stěnami, kde se nachází okrajová proudnice odtrženého proudu, vzniká vír. Dochází k odebrání energie hlavnímu proudu a tím k jejímu rozptylu. Tato energie se nazývá ztrátová měrná energie e_z nebo Y_z vztažená na jednotku hmotnosti a je dána vztahem:

$$e_z = Y_z = \frac{p_z}{\rho} = gh_z = \zeta \frac{v^2}{2}, \quad (2.1)$$

kde p_z – tlaková ztráta (spád) u třecích ztrát na celé délce l , u místních ztrát před a za místním odporem, ρ – hustota tekutiny, g – gravitační zrychlení, h_z – ztrátová výška, ζ – ztrátový součinitel, v – rychlost proudící tekutiny [1].



Obr. 2.1 - Tlakový spád a tečné napětí [2]

2.1. Charakteristika třecích ztrát

Rozptýlená energie, která závisí na druhu proudění tekutiny a tvaru daného potrubí, vyjadřuje velikost třecích ztrát. U třecích ztrát je definován tzv. součinitel tření λ , který je závislý na druhu proudění dle Re a poměrné relativní drsnosti ε . Platí zde funkce $\lambda = f(Re, \varepsilon)$.

Relativní drsnost je definována vztahem:

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad (2.2)$$

k – střední drsnost stěny potrubí, d – průměr potrubí [1].

Rozptýlená ztrátová energie vyjadřující třecí ztráty je definována:

$$e_z = gh_z = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \quad (2.3)$$

Další možností je vyjádření tlakové ztráty pomocí vzorce:

$$p_z = \rho e_z = \rho gh_z = \rho \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \quad (2.4)$$

Ztrátový součinitel je definován vztahem:

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d} \quad (2.5)$$

Vztah pro součinitele tření se u laminárního proudění vyjadřuje vztahem:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.6)$$

a pro turbulentní proudění v hydraulicky hladkém potrubí platí vztah dle Blasia:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (2.7)$$

tento vztah platí pouze v rozmezí $Re_k \leq Re \leq 8 \cdot 10^4$.

Dalším autorem je Nikuradse, který pro větší rozsah Re udává tento vztah:

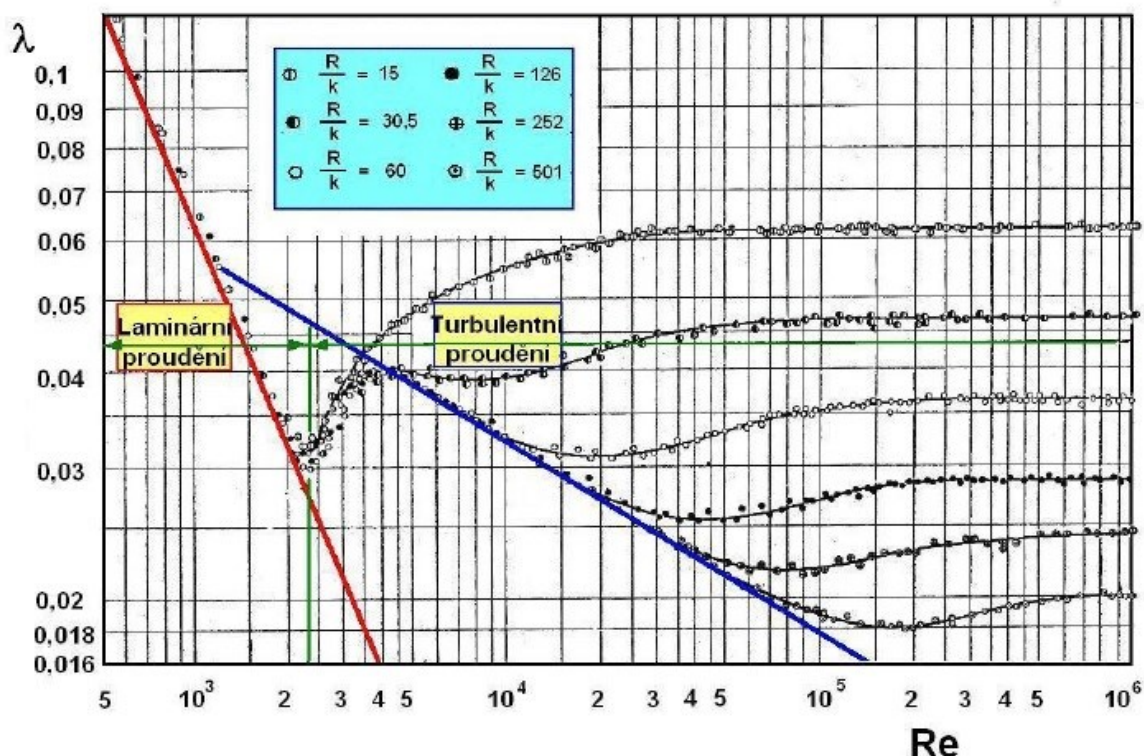
$$\lambda = 0,0032 + 0,221Re^{-0,237} \quad (2.8)$$

pro rozsah $2320 \leq Re \leq 1,5 \cdot 10^6$

dále Colebrook:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \log Re - 1,521)} \quad (2.9)$$

Pro drsná potrubí se uvádí tzv. drsnost potrubí k , která závisí na druhu materiálu, ale také na podmínkách jako je např.: koroze. Nikuradse dle výsledků svého měření sestrojil diagram (obr. 2.2), pro různé poměrné drsnosti k_r , které se odchyľují od Blasiovy přímky znázorňující průběh součinitele tření pro hladké potrubí [2].



Obr. 2.2 - Nikuradseho diagram, červená přímka - laminární proudění, modrá přímka - Blasiova přímka [2]

Součinitele tření pro vyvinuté turbulentní proudění u drsného potrubí Nikuradse vyjádřil takto:

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \log \frac{d}{k} - 1,138\right)^2} \quad (2.10)$$

platnost tohoto vztahu je pro $\frac{k}{d} Re \sqrt{\lambda} > 191,2$

Vzorec pro drsná potrubí podle Moodyho:

$$\lambda = 0,0055 \left[1 + \left(\frac{10^6}{Re} + 2 \cdot 10^4 \frac{k}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (2.11)$$

Colebrooka:

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \log \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + 0,27 \frac{k}{d} \right) \right]^2} \quad (2.12)$$

Filonenka:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0,25} \quad (2.13)$$

Altšula:

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{100}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0,25} \quad (2.14)$$

2.2. Charakteristika místních ztrát

Místními ztrátami nebo také místními odpory myslíme ztráty, které vznikají na částech potrubí, mimo dlouhé rovné úseky se stálým průřezem. Tyto části jsou například různá kolena, zakřivené potrubí, T-kusy, prvky uzavírací, regulační či měřicí. Mezi další prvky mající vliv na místní ztráty můžeme zařadit části potrubí s okamžitou nebo pozvolnou změnou průměru. Tyto prvky a části potrubí způsobují změnu velikosti a směru proudění, to vyvolává víření a tedy rozptyl energie proudící kapaliny. Tato rozptýlená energie nebo také ztráta bývá několikrát větší, než je rozptýlená energie třecími ztrátami [1].

Místní ztráty jsou definovány především vyjádřenou rychlostní výškou a ztrátovým součinitelem:

$$h_{zm} = \zeta_m \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.15)$$

Jednou z dalších možností je vyjádření místních ztrát, ztrátovou měrnou energií

$$e_z = gh_z = \zeta_m \frac{v^2}{2} \quad (2.16)$$

Z rovnice je ζ_m ztrátovým součinitelem, který závisí na různých okolnostech jako je např. druh místních ztrát, konstrukční provedení, drsnost stěn a průřezu potrubí nebo druhu proudění média. Druhem proudění je myšleno velikost Reynoldsova čísla, které se projevuje především při malých hodnotách. Reynoldsovo číslo se určí ze vztahu:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (2.17)$$

kde ν – rychlost proudění tekutiny, d – průměr potrubí a ν – kinematická viskozita [1].

Pokud je hodnota Reynoldsova čísla velká, součinitel místních ztrát je téměř konstantní. Teoretické určení ztrátového součinitele je krom jednoduchých případů nemožné. Za těchto okolností se součinitel místních ztrát určuje experimentálně, pak platí pouze v podmínkách, ve kterých byl zjištěn [1].

Jednou z dalších možností určení místních ztrát je vyjádření ekvivalentní délky potrubí, kde je třecí ztráta obdobná jako ztráta místní.

$$h_{zm} = \zeta_m \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2.18)$$

$$l_e = \frac{\zeta_m}{\lambda} d \quad (2.19)$$

Z rovnice (2.18.) se vyjádří ekvivalentní délka potrubí, kde λ je součinitel tření a d značí průměr potrubí.

3. Metody měření veličin v hydraulice

Mezi nejdůležitější měřené veličiny v hydraulice patří průtok (objemový a hmotnostní) nebo střední rychlost, která je daná podílem průtoku a plochy průtočného průřezu a tlakový spád mezi dvěma průřezy potrubí [3].

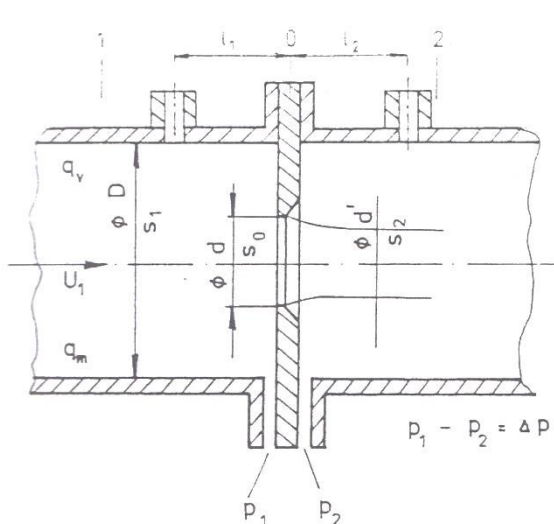
3.1 Metody měření průtoku

Průtok a jeho měření patří k nezákladnějším měřením v hydromechanice. Existuje celá řada přístrojů pro měření průtoku v potrubí. Používají se např. škrťací orgány, rotametry pro malé průtoky nebo indukční průtokoměr. Není výjimkou použití metody vážením nebo zjišťováním průtoku do odměrné nádoby. Dále se využívají sondy, mezi které patří Pitotova trubice a Prandtlůva trubice [4].

Průtokoměry je možno použít jako stálou část potrubí nebo součást měřicího úseku. Pokud je daný průtokoměr stálou součástí potrubí, je předností použít takový průtokoměr, protože vlastní tlakovou ztrátou nezvyšuje celkový odpor potrubí [3].

3.1.1. Měření průtoku tekutin pomocí škrťacího orgánu

Je-li v potrubí umístěn škrťací orgán, clona (obr. 3.1), dýza nebo Venturiho trubice, zapříčiní to vznik tlakové difference před a za tímto orgánem a ta je úměrná průtočnému množství. Pokud jsou dodrženy veškeré předpisy normy, tzn. tvar a umístění škrťacího orgánu, pak není potřeba cejchování a mohou se určit součinitelé dle předepsané normy. Před a za škrťacím orgánem musí být umístěny rovné úseky potrubí, jejichž parametry jsou obsaženy v normě ISO 5167-1 [4].



Obr. 3.1 - Řez clonou [4]

Hmotnostní průtok clonou se pak určí z následujícího vztahu:

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_{e1} \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho_1} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_{e2} \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho_2} \quad (3.1)$$

zde je C součinitelem průtoku, β je poměrem průměrů $\beta = d/D$, ε_e je součinitel expanze, d je průměr otvoru clony, Δp značí diferenční tlak a ρ je hustota tekutiny [4].

Objemový průtok se následně určí z rovnice:

$$Q_V = \frac{Q_m}{\rho} \quad (3.2)$$

Mezi součiniteli expanze je dán vztah

$$\varepsilon_{e2} = \varepsilon_{e1} \sqrt{1 + \frac{\Delta p}{p_2}} \quad (3.3)$$

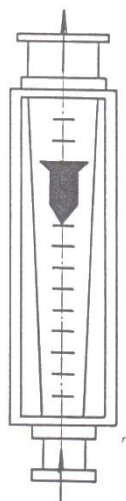
3.1.2. Plovákový průtokoměr

Plovákový průtokoměr nebo také rotametr je měřidlo, jehož funkce spočívá v měření průtočného množství kapaliny změnou průtočné plochy, při stálém tlaku. Jeho konstrukce je tvořena ze svislé, většinou skleněné kuželové trubice, ve které je umístěn plovák (obr. 3.2). Ten je nadnášen protékající kapalinou a jeho poloha závisí na velikosti průtoku, který se odečítá ze stupnice na skleněné trubici [4] [5].

Pro objemový průtok, který závisí na zdvihu plováku, je dán vztah

$$Q_V = (S_1 - S_{pp}) \cdot k \cdot \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} \quad (3.4)$$

kde $(S_1 - S_{pp})$ je průtočný průřez (volný průřez mezi plováčkem a trubicí), $p_1 - p_2$ je tlakový spád na plováku, k značí konstantu, která vznikla při úpravě původní rovnice a ρ je hustota měřené tekutiny [5].



Obr. 3.2 – Rotametr [4]

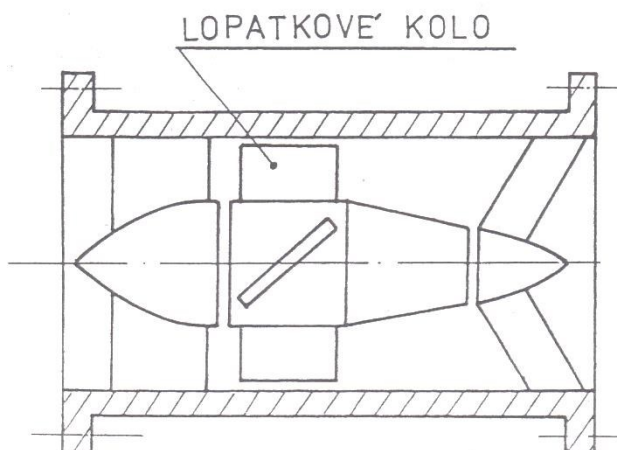
3.1.3. Rychlostní průtokoměry

Existuje celá řada rychlostních průtokoměrů. Mezi nejhlavnější patří vrtulkové, jednovtokové, vícevtokové, vodoměry a šroubové vodoměry. Hlavním prvkem průtokoměrů je lopatkové kolo, které uvádí do pohybu kinetická energie proudící kapaliny. Řez průtokoměrem je zobrazen na obrázku (obr. 3.3) [6].

Objemový průtok lze vyjádřit pomocí počtu otáček lopatkového kola dle vztahu

$$Q_V = k_1 \cdot n + k_2, \quad (3.5)$$

k_1 a k_2 jsou konstanty, které se určují při cejchování přístroje a n značí otáčky.



Obr. 3.3 - Woltmannovo měřidlo [4]

3.1.4. Měření průtoku pomocí nezatíženého hydromotoru

Pro měření průtoku lze také použít nezatížený hydromotor, který je významný především svou jednoduchostí a spolehlivostí. Princip měření spočívá ze snímání otáček daného nezatíženého hydromotoru a pro objemový průtok platí tento vztah

$$Q_V = n \cdot V_g \quad (3.6)$$

kde V_g je geometrický objem hydromotoru, zjistitelný z jeho parametrů a n jsou otáčky hydromotoru [4].

3.2 Měření tlaku

Tlak je fyzikální veličina, při jejímž měření lze vycházet ze dvou základních definic:

1. Měřený tlak je definován jako působící síla vztažená na jednotku plochy, tedy platí vztah:

$$p = \frac{F}{S} \quad (3.7)$$

2. Zejména u kapalin v klidném stavu se využívá rovnice pro hydrostatický tlak ve tvaru:

$$p = h\rho g \quad (3.8)$$

Z rovnice h je výška hladiny, ρ značí hustotu dané kapaliny a g je gravitační zrychlení [7].

Dalším vyjádřením tlaků je vůči tlaku atmosférickému a takový tlak se nazývá relativní. Pokud má kladnou hodnotu, udává se jako přetlak a pokud má hodnotu zápornou, jedná se podtlak. Zde platí vztah:

$$p_a = p_0 + p_r \quad (3.9)$$

Pokud jsou tlaky měřeny od počátku, tedy od nuly, hovoří se o tlacích absolutních [6].

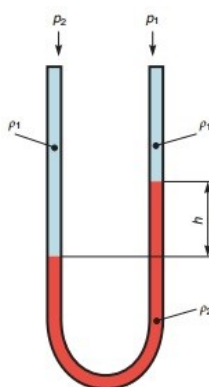
3.2.1. Kapalinové tlakoměry

Využití nacházejí převážně pro přesné měření malých tlaků a díky své jednoduchosti jsou nepoužívanějšími měřicími přístroji. Příkladem je U-tlakoměr, který je tvořen skleněnou trubicí ve tvaru U a naplněnou měřicí kapalinou nejčastěji alkoholem, tetrachlorem nebo rtutí (obr. 3.4). Tlak lze určit dle vztahu:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1)gh \quad (3.10)$$

kde h je změřený rozdíl výšek.

Dalšími možnými tlakoměry jsou tlakoměr nádobkový, mikromanometr se skloněným ramenem nebo tlakoměr Betz [4] [5].

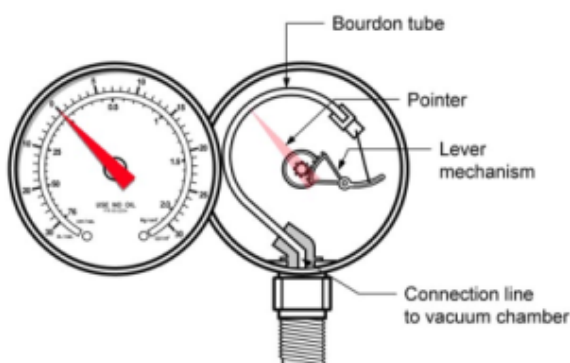


Obr. 3.4 - U-tlakoměr [7]

3.2.2. Tlakoměry deformační

U těchto tlakoměrů je měřený tlak převáděn na měření deformace. Hlavním členem deformačních tlakoměrů je elastický člen, který je namáhán měřeným tlakem [4].

Nejběžnějším a nejpropracovanějším elastickým členem je Bourdonova trubice. Při jejím zatížení vliv deformace se napřimuje a tím dojde k vychýlení volného konce. Převodový mechanismus zajistí, že výchylka se přenese na ručičku, která ukazuje velikost tlaku. Deformační tlakoměry se vyrábí v třídě přesnosti 2,5% nebo pro přesnější měření 1%. Jsou citlivé na přetížení a je nutné je často cejchovat [4] [5].



Obr. 3.5 - Řez deformačním tlakoměrem [8]



Obr. 3.6 – Deformační tlakoměr [9]

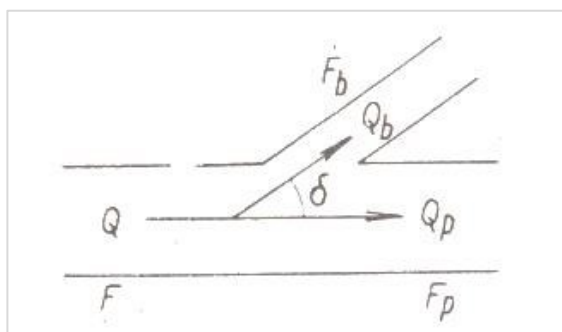
Na obrázku (obr. 3.5) je znázorněn řez deformačním tlakoměrem s Bourdonovou trubicí, kde je Bourdon tube – Bourdonova trubice, Pointer – ukazatel, Level mechanism – pákový mechanismus a Connection line to vacuum chamber – přípojka k vývěvě [8].

4. Literární rešerše měření hydraulických ztrát na T-kusu

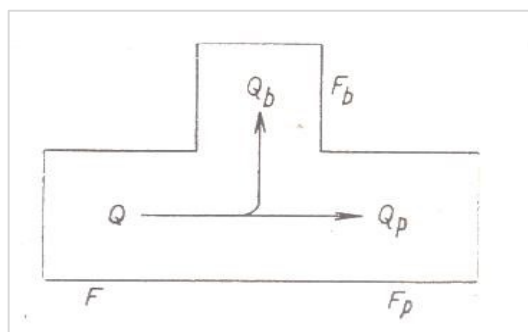
K rozdělení proudu do dvou a více potrubí se využívají tzv. rozbočky. Nejčastěji využívanými prvky jsou T-kusy s boční kolmou přípojkou (T 90°) nebo přípojkou svírající úhel menší než 90° např. (T 45°) nebo (T 60°). Tato kapitola pojednává o definici a výpočtu ztrátových součinitelů pomocí zjednodušených vztahů, které jsou popsány v literatuře Hydraulika průmyslových armatur [3].

Tvarovky typu T se vlivem zapojení rozdělují na dva druhy a to na tvarovky výtlačné (obr. 4.1) a (obr. 4.2), kde se proud rozděluje a tvarovky sacího typu (obr. 4.5) a (obr. 4.6), kde dochází ke spojení proudů [3].

4.1 Tvarovky výtlačného typu



Obr. 4.1 - Tvarovka T se šikmou jednostrannou výtlačnou odbočkou [3]



Obr. 4.2 - Tvarovka T s kolmou výtlačnou odbočkou [3]

Hlavní příčinou vzniku ztrát v odbočce je odtržení proudu v odbočující větví dané tvarovky za zlomem, kde vzniká zavírání [3].

Pro průtoky platí vztah:

$$Q = Q_b + Q_p \quad (4.1)$$

Výpočet ztrátového součinitele pro výtlačnou tvarovku typu T, pro různé úhly naklonění přípojky se provádí pro každou větev zvlášť a je dán vztahy:

$$\zeta_b = c_b \left[1 + \left(\frac{Q_b S}{Q S_b} \right)^2 - 2 \frac{Q_b S}{Q S_b} \cos \delta \right] \quad (4.2)$$

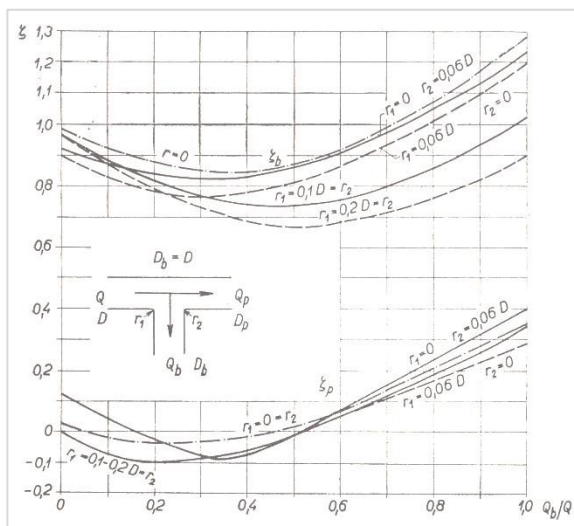
hodnota δ vyjadřuje úhel naklonění přípojky

$$\zeta_p = c_p \left[1 + \left(\frac{Q_b S}{Q S_p} \right)^2 - 2 \frac{Q_b S}{Q S_p} \right] \quad (4.3)$$

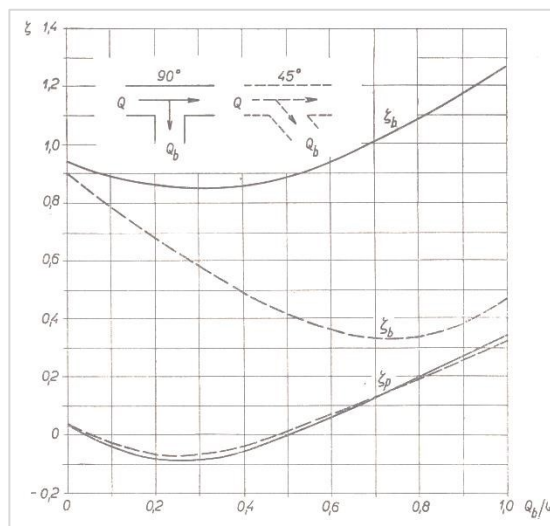
Průřezy tvarovky S , S_b a S_p jsou shodné s průřezy označené F , F_b a F_p , jak je tomu na obrázcích (obr. 4.1) a (obr. 4.2). Součinitelé c_b a c_p jsou opravné [3].

Existuje řada tvarovek s rozdílnými průřezy vstupní větve a odbočky a také s různými hodnotami vnitřního zaoblení a to jak hrany vstupní, tak hrany výstupní [3].

Na diagramu (obr. 4.3) je znázorněn vliv vnitřního zaoblení vstupní a výstupní hrany přímého a bočního proudu na ztrátového součinitele [3].



Obr. 4.3 - Diagram znázorňující vliv zaoblení vnitřních hran na ztrátového součinitele [3]

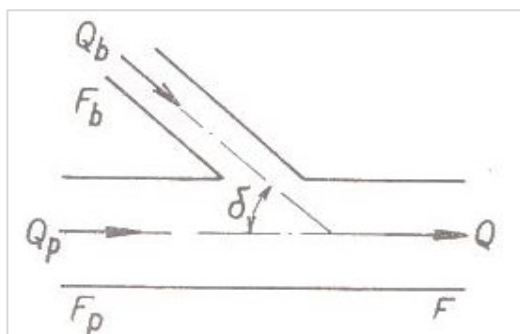


Obr. 4.4 - Diagram znázorňující vliv naklonění přípojky pod úhlem 90° a 45° na ztrátového součinitele [3]

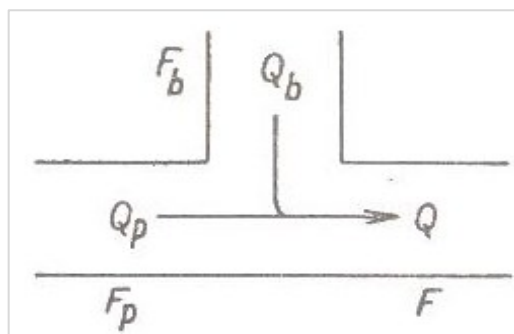
Na diagramu (obr. 4.4) je zakreslen vliv naklonění výtlačné odbočky na ztrátové součinitele přímého a bočního proudu [3].

4.2 Tvarovky sacího typu

Druhým typem tvarovek jsou tvarovky sací.



Obr. 4.5 - Tvarovka T se šikmou sací přípojkou [3]



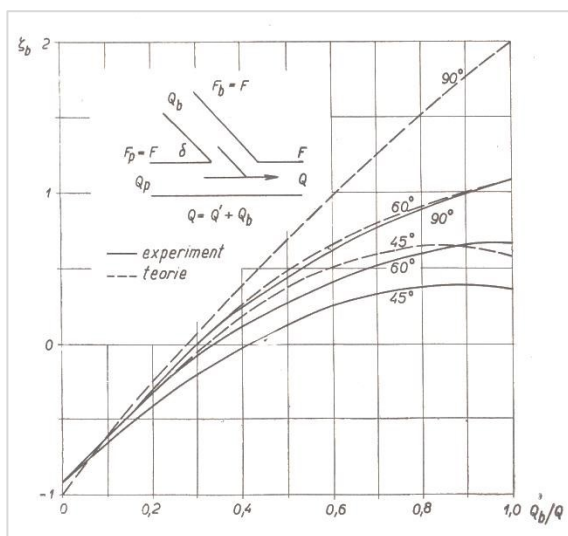
Obr. 4.6 - Tvarovka T s kolmou sací přípojkou [3]

Vztah pro výpočet ztrátového součinitele se udává obdobně jako u tvarovek výtlačného typu:

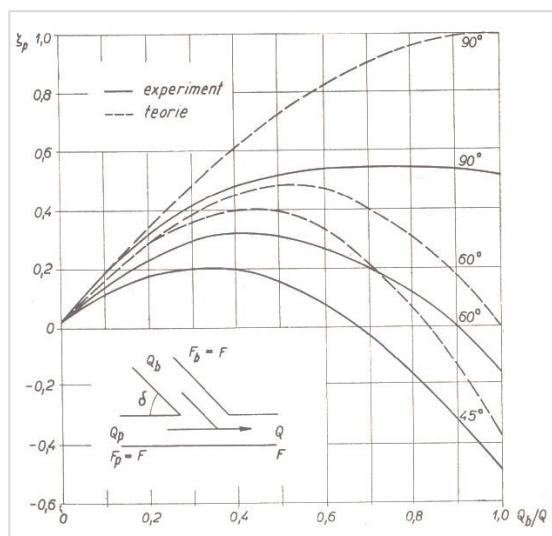
$$\zeta_b = c_b \left[1 + \left(\frac{Q_b}{Q} \frac{S}{S_b} \right)^2 - 2 \left(\frac{Q_b}{Q} \right)^2 \frac{S}{S_b} \cos \delta - 2 \left(1 - \frac{Q_b}{Q} \right)^2 \frac{S}{S_p} \right] \quad (4.4)$$

v přímé větvi platí $\delta = 0$

$$\zeta_p = \zeta_b + c_p \left[\left(1 - \frac{Q_b}{Q}\right)^2 \left(\frac{S}{S_p}\right)^2 - \left(\frac{Q_b}{Q} \frac{S}{S_b}\right)^2 \right] \quad (4.5)$$



Obr. 4.7 - Diagram závislosti ztrátového součinitele boční větve na poměru průtoků při různých úhlech naklonění [3]



Obr. 4.8 - Diagram závislosti ztrátového součinitele přímé větve na poměru průtoků při různých úhlech naklonění [3]

Diagramy (obr. 4.7) a (obr. 4.8) znázorňují závislost ztrátových součinitelů proudů pro proud v přímé a boční větvi na poměrném průtoku. Křivky jsou vyhodnoceny teoreticky dle uvedených vzorců a experimentálními výsledky Thomových pokusů pro úhly $\delta = 45^\circ, 60^\circ$ a 90° [3].

5. Vyhodnocení ztrátových součinitelů dle experimentu

Ve čtvrté kapitole je popsán výpočet ztrátových součinitelů z teoretického hlediska, neboli dle zjednodušených vzorců. Pro výpočet ztrátových součinitelů dle experimentu je využita literatura Internal flow systems 2nd edition od autora D. S. Millera [10], kde jsou definovány příslušné vztahy. Tento výpočet se provádí stejně jako pro teoretický výpočet, jak je popsáno ve čtvrté kapitole, tedy pro každou větev zvlášť.

Pro ztrátový součinitel boční větve tvarovky výtlačného typu platí následující vztah:

$$\zeta_{b(\text{měř.})} = \frac{\left[\left(\frac{v^2}{2g} + h \right) - \left(\frac{v_b^2}{2g} + h_b \right) \right] 2g}{v^2} \quad (5.1)$$

a pro ztrátový součinitel přímé větve výtlačné tvarovky je definován vzorec:

$$\zeta_{p(\text{měř.})} = \frac{\left[\left(\frac{v^2}{2g} + h \right) - \left(\frac{v_p^2}{2g} + h_p \right) \right] 2g}{v^2} \quad (5.2)$$

kde v , v_b a v_p jsou rychlosti proudění v jednotlivých větvích, h , h_b , h_p jsou měřené tlakové výšky na každé větvi T-kusu a g značí gravitační konstantu.

Ztrátový součinitel boční větve sací tvarovky lze určit ze vztahu:

$$\zeta_{b(\text{měř.})} = \frac{\left[\left(\frac{v_b^2}{2g} + h_b \right) - \left(\frac{v^2}{2g} + h \right) \right] 2g}{v^2} \quad (5.3)$$

pro přímou větev tvarovky sacího typu je definován následující vztah:

$$\zeta_{p(\text{měř.})} = \frac{\left[\left(\frac{v_p^2}{2g} + h_p \right) - \left(\frac{v^2}{2g} + h \right) \right] 2g}{v^2} \quad (5.4)$$

K určení rychlosti proudění lze vyjít ze vztahu pro výpočet objemového průtoku. Po jeho úpravě je získán následující vztah:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (5.5)$$

kde Q značí objemový průtok, S udává průřez potrubí, d označuje průměr (světlost) potrubí a π je matematická konstanta ($\pi = 3,1415925$).

Tlakové výšky a průtoky budou měřeny v jednotlivých větvích na sestavených experimentálních tratích.

6. Návrh experimentální měřicí tratě

Návrh a zhotovení experimentální měřicí tratě, pro měření hydraulické ztráty na tvarovce typu T s kolmou sací odbočkou (přípojkou), byly provedeny v prostorách Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, v laboratoři E306, Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení.

Na experimentální trati byl měřen objemový průtok celkový (přiveden z čerpadla) a objemový průtok na jedné větvi před vstupem do tvarovky. Další měřenou veličinou byl hydrostatický tlak na jednotlivých větvích před vstupem do tvarovky. Tyto veličiny budou sloužit k dalšímu zpracování a vyhodnocování hydraulické ztráty tvarovky. Experimentální trať byla navržena tak, aby umístěné prvky (průtokoměry a odběrná místa pro měření tlakové difference výšek) splňovaly svou funkci a byly co nejpřesnější.

6.1 Použité prvky a jejich specifikace

Pro měření hydraulických ztrát na T-kusu byly navrženy různé varianty vodních tratí skládající se z následujících prvků:

Čerpadlo (HG)

Výrobce:	WILO
Typ:	TOP-S30/10
Jmenovitá světlost:	DN 6/10
Krytí:	IP 44
Příkon:	$P_1 = 390\text{W}; 385\text{W}; 335\text{W}$
Napájení:	230V/50Hz



Obr. 6.1 – Čerpadlo WILO

Průtokoměr indukční (Q_3)

Výrobce:	Elis Plzeň a.s.
Typ:	FLONET FN 2014
Příkon:	10 W
Jmenovitá světlost:	DN 32
Objemový průtok:	$Q_{\min} = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ $Q_{\max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$
Teplota měřené kapaliny:	Do 150°C



Obr. 6.2 – Indukční průtokoměr

Průtokoměr (Q₂)

Výrobce:	Elis Plzeň a.s.
Typ:	FLOMIC FL 1014
Tlak:	1,6 MPa
Krytí:	IP 67
Proudový výstup:	(4÷20) mA



Obr. 6.3 – Průtokoměr FLOMIC

Kulový kohout (KK)

Výrobce:	WAVIN Ekoplastik, s.r.o.
Typ:	SVEK025XXX
Světlost:	18 mm



Obr. 6.4 – Kulový kohout WAVIN

T-kus

Výrobce:	WAVIN Ekoplastik, s.r.o.
Typ:	STK025XXXX
Světlost:	18 mm
Délka:	50 mm



Obr. 6.5 – T-kus WAVIN

U-trubice (h)

Výrobce:	VŠB-TU Ostrava
----------	----------------

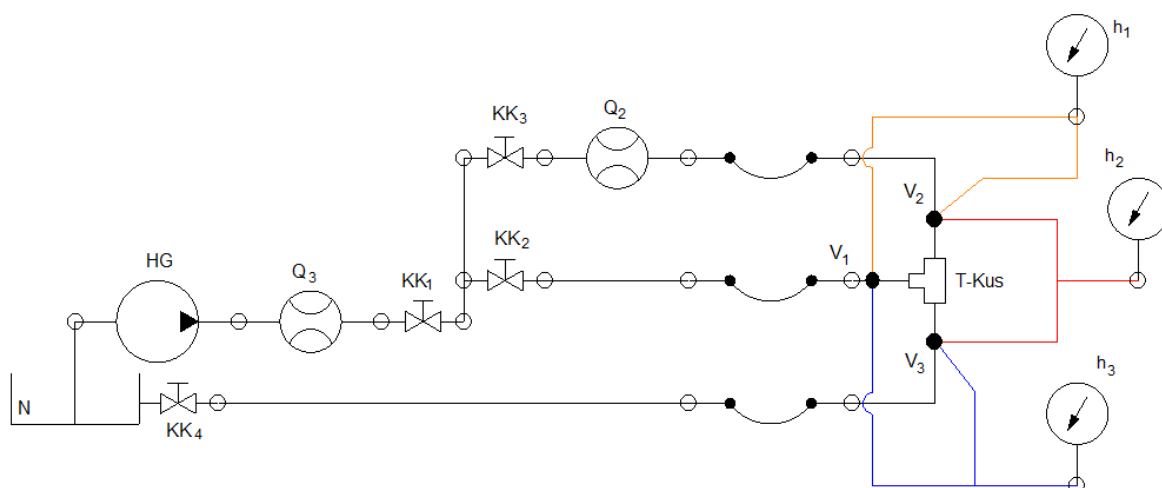
Nádrž (N)

Výrobce:	Valter Špalek – plexi
Objem:	80 l

6.2 Varianty zapojení měřících tratí

U první varianty měřící tratě (obr. 6.6) je hlavní průtokoměr (Q_3) orientován mezi čerpadlem (HG) a hlavním kulovým kohoutem (KK_1). Za hlavním kulovým kohoutem se trať rozděluje do dvou větví (V_1) a (V_2), které jsou vedeny pomocí hadic do T-kusu, pro snadnou montáž a demontáž. Obě větve jsou na počátku osazeny kulovými kohouty (KK_2) a (KK_3) pro regulaci průtoku jednotlivých větví zvlášť a na větvi (V_2) je umístěn průtokoměr (Q_2). Na každé větvi před vstupem do T-kusu a před jeho výstupem jsou umístěná odběrná místa, přibližně 0,2 metru od okraje tvarovky, sloužící pro měření hydrostatického tlaku, respektive výšky hladiny v U-trubici, ze které se dopočítá hydrostatický tlak. Výstupní větev z tvarovky (V_3) je odpadní hadice, která vrací veškerý tok zpět do nádrže (N). Tato větev je na konci osazena kulovým kohoutem (KK_4), který slouží pro regulaci průtoku v celém otevřeném obvodu.

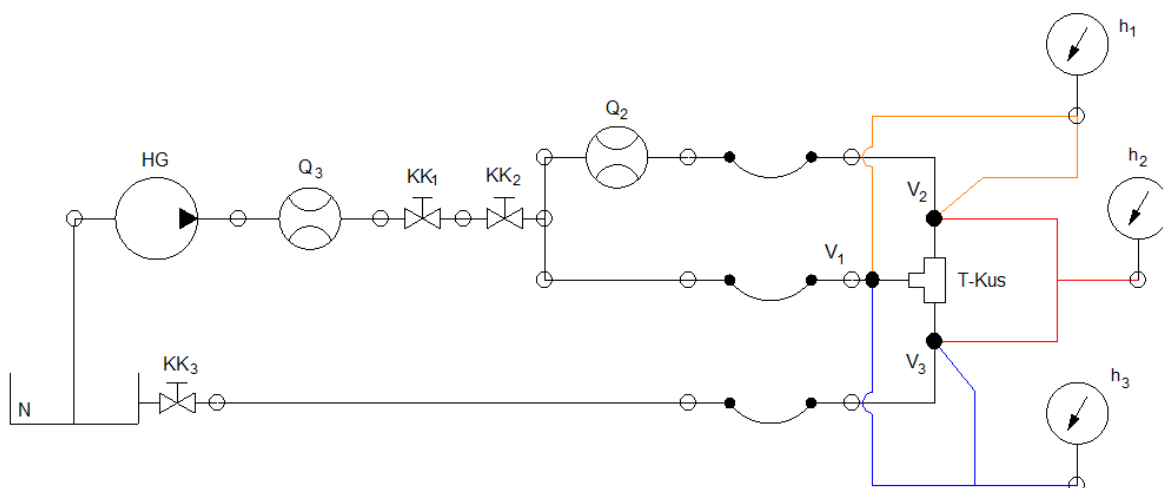
U této varianty jsou dvě vstupní části proudů a to boční větev a kolmá přípojka, můžeme tedy říci, že se jedná o sací druh tvarovky.



Obr. 6.6 – Schéma zapojení první varianty měřící tratě

Návrh druhé měřící tratě (obr. 6.7) je obdobou první varianty. Rozdíl je pouze v nahrazení dvou kulových kohoutů pro každou větev, pouze jedním (KK_2). Zde již není možnost ovládání objemového průtoku na každé větvi zvlášť, ale pouze jedním kulovým kohoutem pro obě větve najednou.

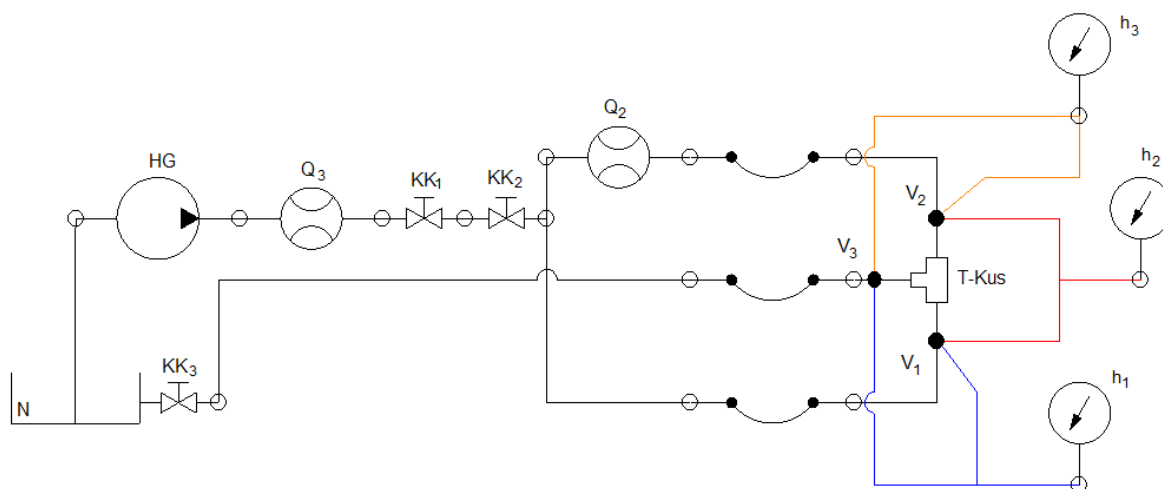
Pro tuto variantu zapojení platí totéž co pro první, jedná se tedy o tvarovku sacího typu.



Obr. 6.7 – Schéma zapojení druhé varianty měřicí tratě

Poslední varianta měřicí tratě (obr. 6.8) se shoduje s variantou druhou, kde jsou oba kulové kohouty nahrazeny jedním. Rozdílem je zapojení vstupů do T-kusu, kde se jednotlivé proudy spojují proti sobě, tedy oběma vstupy je boční větev a výstupem je kolmá přípojka, která je nyní označena jako odpadní (V_3).

U tohoto typu zapojení můžeme rovněž říci, že se jedná o tvarovku sacího typu.



Obr. 6.8 – Schéma zapojení třetí varianty měřicí tratě

7. Měření a vyhodnocování pro jednotlivé návrhy měřících tratí

Jak již bylo zmíněno v druhém odstavci čtvrté kapitoly, na jednotlivých měřících tratích byl měřen celkový objemový průtok celého obvodu a objemový průtok jedné větve. Průtok poslední větve byl dopočítán jako rozdíl dvou naměřených průtoků. Dále byly měřeny výšky hladin U-trubice před každým ze vstupů do tvarovky.

7.1 Vyhodnocení první varianty měřící tratě

Po spuštění čerpadla (HG) a ustálení tlaku a průtoku pomocí konečného kulového kohoutu (KK₄), byl pro první měření první varianty měřící tratě (obr. 6.6) škrcen průtok celého otevřeného obvodu hlavním kulovým kohoutem (KK₁), který byl zcela otevřen a postupně po krocích uzavírán. Po jednotlivých krocích byly odečítány hodnoty hlavního průtokoměru (Q_3), průtokoměru (Q_2), který je umístěn na větvi (V_2) a dále byly odečítány výšky hladin U-trubice h_1 , h_2 a h_3 . Celkem bylo naměřeno jedenáct hodnot, které jsou zobrazeny v tabulce (tab. 7.1).

Tab. 7.1 – Naměřené a počítané hodnoty prvního měření

Naměřené hodnoty					Počítané hodnoty			
Q_2	Q_3	h_1	h_2	h_3	Q_1	v_1	v_2	v_3
[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[m]	[m]	[m]	[m ³ .s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]
0,000408	0,000560	0,905	0,855	0,595	0,000152	0,597	1,60	2,20
0,000411	0,000556	0,895	0,840	0,585	0,000144	0,568	1,62	2,18
0,000408	0,000544	0,853	0,810	0,570	0,000136	0,535	1,60	2,14
0,000397	0,000531	0,790	0,750	0,515	0,000134	0,526	1,56	2,09
0,000389	0,000524	0,745	0,700	0,470	0,000135	0,532	1,53	2,06
0,000378	0,000511	0,685	0,645	0,433	0,000133	0,522	1,48	2,01
0,000364	0,000496	0,618	0,580	0,370	0,000132	0,519	1,43	1,95
0,000350	0,000480	0,550	0,515	0,320	0,000130	0,511	1,38	1,89
0,000336	0,000460	0,470	0,435	0,260	0,000124	0,486	1,32	1,81
0,000328	0,000443	0,405	0,375	0,205	0,000115	0,453	1,29	1,74
0,000308	0,000421	0,315	0,290	0,135	0,000113	0,442	1,21	1,65

Výpočet objemového průtoku Q_1 vychází z rozdílů průtoků Q_3 a Q_2 a tedy pro první řádek tabulky (tab. 7.1) platí:

$$Q_1 = Q_3 - Q_2 = 0,00056 - 0,000408 = 0,000152 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Z vypočítaného objemového průtoku lze určit rychlost proudění dle vztahu (5.5). Pro určení rychlosti proudění je potřeba znát světlost potrubí, které vchází do tvarovky. Světlost daného potrubí je $d = 0,018 \text{ m}$, která je na každé větvi stejná.

Následující výpočet odpovídá prvnímu řádku tabulky (tab. 7.1) a je určen pro rychlost proudění v_1 , pro ostatní hodnoty rychlostí z tabulky platí stejný vztah, tedy:

$$v_1 = \frac{Q_1}{S} = \frac{4Q_1}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,000152}{\pi \cdot 0,018^2} = 0,597 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Určení ztrátových součinitelů se provádí pro každou větev zvlášť. Pro sací tvarovku platí vztahy (4.4) a (4.5). Pro ztrátový součinitel boční větve zvolíme označení ζ_b . Opravné součinitele c_b a c_p jsou pro kolmou tvarovku voleny podobně jako u difuzorů a pro náš případ $c_b = 1$ a $c_p = 1$. Poměr průřezů tvarovky je v našem případě shodný $\frac{S}{S_b} = 1$ a $\frac{S}{S_p} = 1$. Průtok Q_b je vstupní do boční větve tedy $Q_b = Q_1$ a průtok Q je výstupním z tvarovky tedy $Q = Q_3$. Úhel $\delta = 90^\circ$.

Pro první řádek tabulky (tab. 7.2) platí:

$$\begin{aligned}\zeta_b &= c_b \left[1 + \left(\frac{Q_b}{Q} \frac{S}{S_b} \right)^2 - 2 \left(\frac{Q_b}{Q} \right)^2 \frac{S}{S_b} \cos \delta - 2 \left(1 - \frac{Q_b}{Q} \right)^2 \frac{S}{S_p} \right] = \\ &= 1 \left[1 + \left(\frac{0,000152}{0,00056} \cdot 1 \right)^2 - 2 \left(1 - \frac{0,000152}{0,00056} \right)^2 \cdot 1 \right] = 0,0112\end{aligned}$$

Pro součinitele přímé větve zvolíme označení ζ_p . Ostatní hodnoty jsou shodné s hodnotami pro výpočet ztrátového součinitele ζ_b .

Následující výpočet odpovídá prvnímu řádku tabulky (tab. 7.2):

$$\begin{aligned}\zeta_p &= \zeta_b + c_p \left[\left(1 - \frac{Q_b}{Q} \right)^2 \left(\frac{S}{S_p} \right)^2 - \left(\frac{Q_b}{Q} \frac{S}{S_b} \right)^2 \right] = \\ &= 0,0112 + 1 \left[\left(1 - \frac{0,000152}{0,00056} \right)^2 \cdot 1 - \left(\frac{0,000152}{0,00056} \cdot 1 \right)^2 \right] = 0,469\end{aligned}$$

K výpočtu ztrátových součinitelů pro sací tvarovku na základě měření se využívají vztahy (5.3) a (5.4), rovněž pro každou větev zvlášť. Pro výpočet použijeme stejná označení jako u předchozího výpočtu. Rychlost proudění v boční větvi v_b je rovna rychlosti v_1 a to platí i pro ostatní rychlosti $v_p = v_2$ a $v = v_3$. U měřených tlakových výšek bude platit stejné označení $h_b = h_1$, $h_p = h_2$ a $h = h_3$. K určení ztrátových součinitelů je potřeba znát hodnotu gravitačního zrychlení. Tato hodnota je přibližně $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Následující výpočet udává hodnotu ztrátového součinitele boční větve a odpovídá prvnímu řádku tabulky (tab. 7.2):

$$\begin{aligned}\zeta_{b(\text{měř.})} &= \frac{\left[\left(\frac{v_b^2}{2g} + h_b \right) - \left(\frac{v^2}{2g} + h \right) \right] 2g}{v^2} = \frac{\left[\left(\frac{0,597^2}{2 \cdot 9,81} + 0,905 \right) - \left(\frac{2,2^2}{2 \cdot 9,81} + 0,595 \right) \right] 2 \cdot 9,81}{2,2^2} = \\ &= 0,328\end{aligned}$$

Pro výpočet ztrátového součinitele přímé větve platí následující vztah:

$$\zeta_{p(\text{měř.})} = \frac{\left[\left(\frac{v_p^2}{2g} + h_p \right) - \left(\frac{v^2}{2g} + h \right) \right] 2g}{v^2} = \frac{\left[\left(\frac{1,6^2}{2 \cdot 9,81} + 0,855 \right) - \left(\frac{2,2^2}{2 \cdot 9,81} + 0,595 \right) \right] 2 \cdot 9,81}{2,2^2} =$$

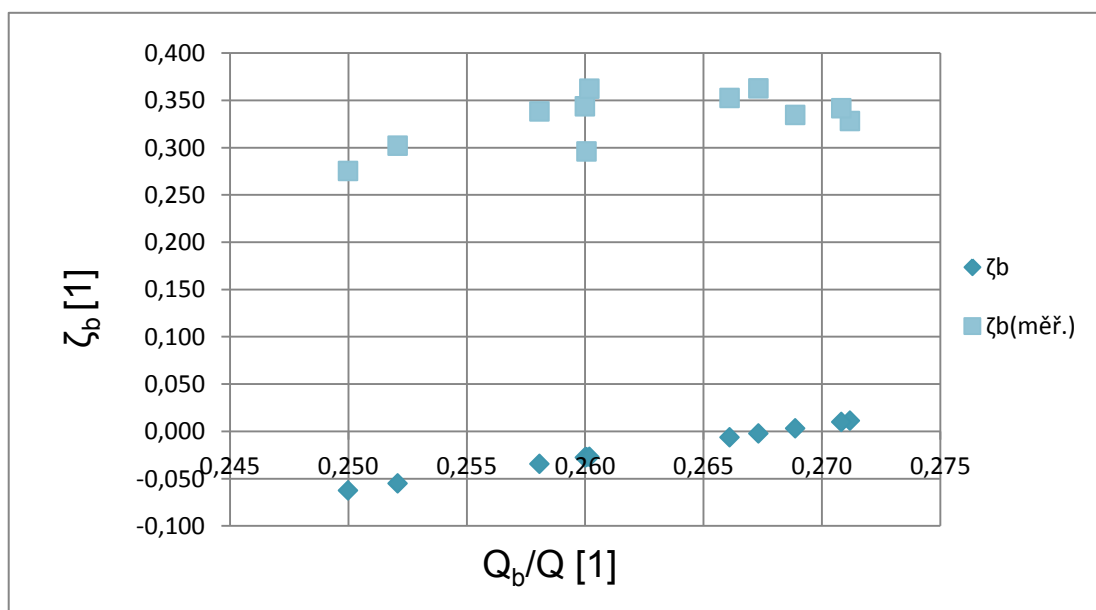
$$= 0,583$$

Tab. 7.2 – Hodnoty ztrátových součinitelů a poměry průtoků prvního měření

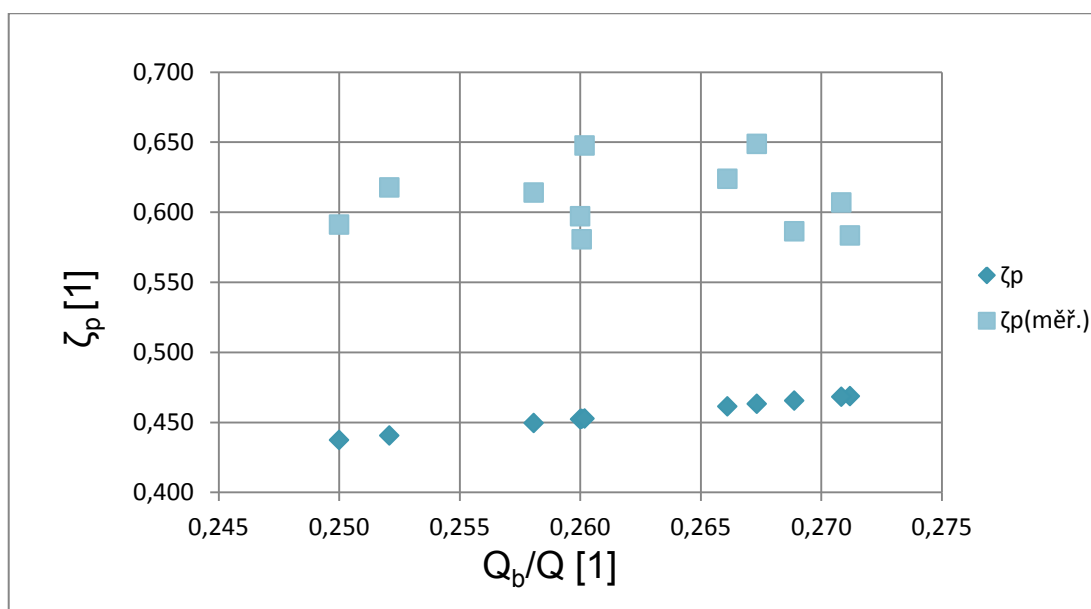
ζ_b	ζ_p	$\zeta_{b(\text{měř.})}$	$\zeta_{p(\text{měř.})}$	Q_b/Q
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
0,01123	0,469	0,328	0,583	0,271
-0,02760	0,452	0,344	0,597	0,260
-0,06250	0,438	0,275	0,591	0,250
-0,05518	0,441	0,302	0,618	0,252
-0,03428	0,450	0,338	0,614	0,258
-0,02737	0,452	0,296	0,581	0,260
-0,00639	0,461	0,352	0,624	0,266
0,00998	0,468	0,342	0,607	0,271
0,00323	0,465	0,335	0,587	0,269
-0,02695	0,453	0,362	0,648	0,260
-0,00216	0,463	0,363	0,649	0,267

Poměr průtoků je dán vždy průtokem boční větve tvarovky a průtokem výstupním tedy pro první řádek tabulky (tab. 7.2) platí:

$$\frac{Q_b}{Q} = \frac{0,000152}{0,00056} = 0,271$$



Obr. 7.1 – Graf závislosti ztrátových součinitelů boční větve na poměru průtoků pro první měření na první variantě měřicí tratě



Obr. 7.2 – Graf závislosti ztrátových součinitelů přímé větve na poměru průtoků pro první měření na první variantě měřicí tratě

Na grafech (obr. 7.1) a (obr. 7.2) je vyhodnocen rozdíl mezi teoretickými hodnotami ztrátových součinitelů (ζ_b ; ζ_p) a měřenými hodnotami ($\zeta_{b(\text{měř.})}$; $\zeta_{p(\text{měř.})}$), kde z dosažených výsledků jsou patrné rozdíly ve velikosti součinitelů.

Druhý případ měření na první variantě měřicí tratě byl proveden způsobem, kdy je uzavřena jedna větev a to vstupní větev do T-kusu (V_1), dle schématu (obr. 6.6), pomocí kulového kohoutu (KK_2). Ostatní kohouty byly zcela otevřené. Při spuštění čerpadla (HG), bylo potřeba ustálit průtok a tlak otevřeného obvodu konečným kulovým kohoutem (KK_4).

Uzavřený kulový kohout (KK_2) byl po jednotlivých krocích otevírán a byly odečítány hodnoty objemového průtoky na průtokoměrech (Q_3) a (Q_2) a výšky hladin v U-trubicí. Celkem bylo provedeno devět měření. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (tab. 7.3).

Tab. 7.3 – Naměřené a počítané hodnoty druhého měření

Naměřené hodnoty					Počítané hodnoty			
Q_2	Q_3	h_1	h_2	h_3	Q_1	v_1	v_2	v_3
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
0,000464	0,000464	0,380	0,315	0,260	0	0	1,823	1,823
0,000458	0,000479	0,455	0,390	0,305	0,0000208	0,082	1,801	1,883
0,000450	0,000499	0,560	0,500	0,375	0,0000486	0,191	1,768	1,959
0,000442	0,000514	0,655	0,593	0,430	0,0000722	0,284	1,736	2,019
0,000433	0,000529	0,745	0,685	0,495	0,0000958	0,377	1,703	2,079
0,000422	0,000546	0,820	0,760	0,540	0,0001236	0,486	1,659	2,145
0,000417	0,000554	0,875	0,820	0,575	0,0001375	0,540	1,637	2,178
0,000411	0,000562	0,915	0,863	0,605	0,0001506	0,592	1,616	2,207
0,000411	0,000563	0,920	0,870	0,605	0,0001522	0,598	1,616	2,214

Výpočet objemového průtoku Q_1 je shodný s výpočtem prvního měření a tedy pro první řádek tabulky (tab. 7.3) platí:

$$Q_1 = Q_3 - Q_2 = 0,000464 - 0,000464 = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Je-li jeden z kohoutů větve (V_1) nebo větve (V_2) uzavřen, bude v dané větvi objemový průtok roven nule.

K výpočtu ztrátových součinitelů použijeme stejné označení jak pro boční větev ζ_b , tak pro přímou větev ζ_p . Výpočet ztrátových součinitelů se provádí stejně jako u prvního měření. Tedy pro boční větev bude platit:

$$\begin{aligned}\zeta_b &= c_b \left[1 + \left(\frac{Q_b S}{Q S_b} \right)^2 - 2 \left(\frac{Q_b}{Q} \right)^2 \frac{S}{S_b} \cos \delta - 2 \left(1 - \frac{Q_b}{Q} \right)^2 \frac{S}{S_p} \right] = \\ &= 1 \left[1 + \left(\frac{0}{0,000464} \cdot 1 \right)^2 - 2 \left(1 - \frac{0}{0,000464} \right)^2 \cdot 1 \right] = -1\end{aligned}$$

a pro přímou větev platí:

$$\begin{aligned}\zeta_p &= \zeta_b + c_p \left[\left(1 - \frac{Q_b}{Q} \right)^2 \left(\frac{S}{S_p} \right)^2 - \left(\frac{Q_b S}{Q S_b} \right)^2 \right] = \\ &= -1 + 1 \left[\left(1 - \frac{0}{0,000464} \right)^2 \cdot 1 - \left(\frac{0}{0,000464} \cdot 1 \right)^2 \right] = 0\end{aligned}$$

oba výpočty ztrátových součinitelů odpovídají prvnímu řádku tabulky (tab. 7.4).

Pro výpočet ztrátových součinitelů na základě měření platí stejný postup, jako u prvního měření. Rychlost proudění se určí následujícím způsobem:

$$v_1 = \frac{Q_1}{S} = \frac{4Q_1}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0}{\pi \cdot 0,018^2} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet rychlosti proudění v_1 platí pro první řádek tabulky (tab. 7.3) a pro ostatní hodnoty rychlostí v_2 a v_3 platí stejný výpočet.

Výpočet ztrátového součinitele boční větve na základě měření $\zeta_{b(\text{měř.})}$ se provede dle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned}\zeta_{b(\text{měř.})} &= \frac{\left[\left(\frac{v_b^2}{2g} + h_b \right) - \left(\frac{v^2}{2g} + h \right) \right] 2g}{v^2} = \frac{\left[\left(\frac{0^2}{2 \cdot 9,81} + 0,38 \right) - \left(\frac{1,823^2}{2 \cdot 9,81} + 0,26 \right) \right] 2 \cdot 9,81}{1,823^2} = \\ &= -0,292\end{aligned}$$

Ztrátový součinitel přímé větve na základě měření $\zeta_{p(\text{měř.})}$ se určí následujícím způsobem:

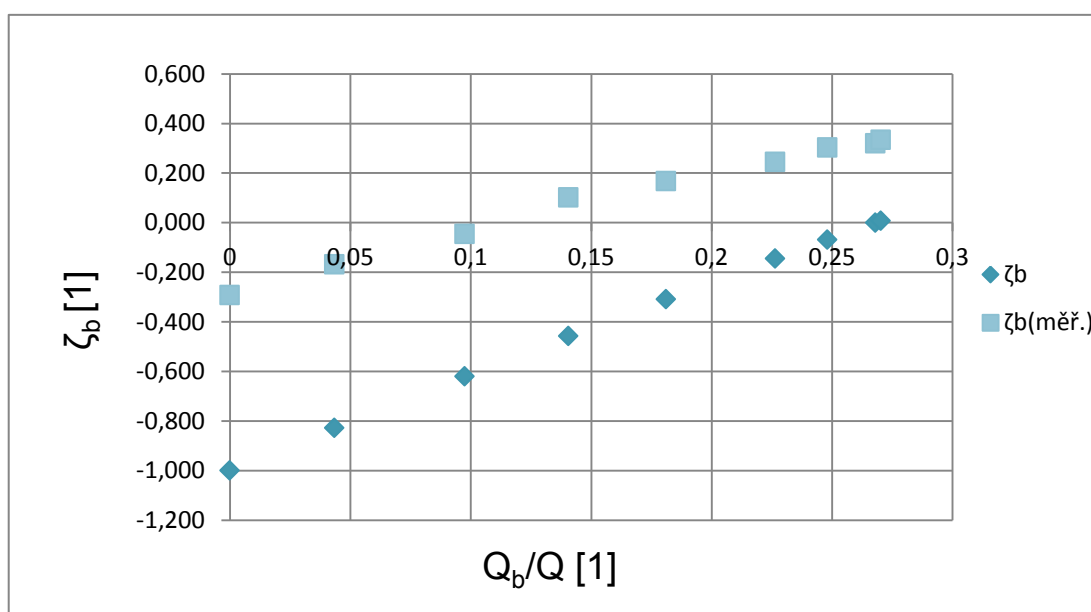
$$\zeta_{p(\text{měř.})} = \frac{\left[\left(\frac{v_p^2}{2g} + h_p \right) - \left(\frac{v^2}{2g} + h \right) \right] 2g}{v^2} = \frac{\left[\left(\frac{1,823^2}{2 \cdot 9,81} + 0,315 \right) - \left(\frac{1,823^2}{2 \cdot 9,81} + 0,26 \right) \right] 2 \cdot 9,81}{1,823^2} =$$

$$= 0,325$$

Výsledné hodnoty obou ztrátových součinitelů odpovídají prvnímu řádku tabulky (tab. 7.4).

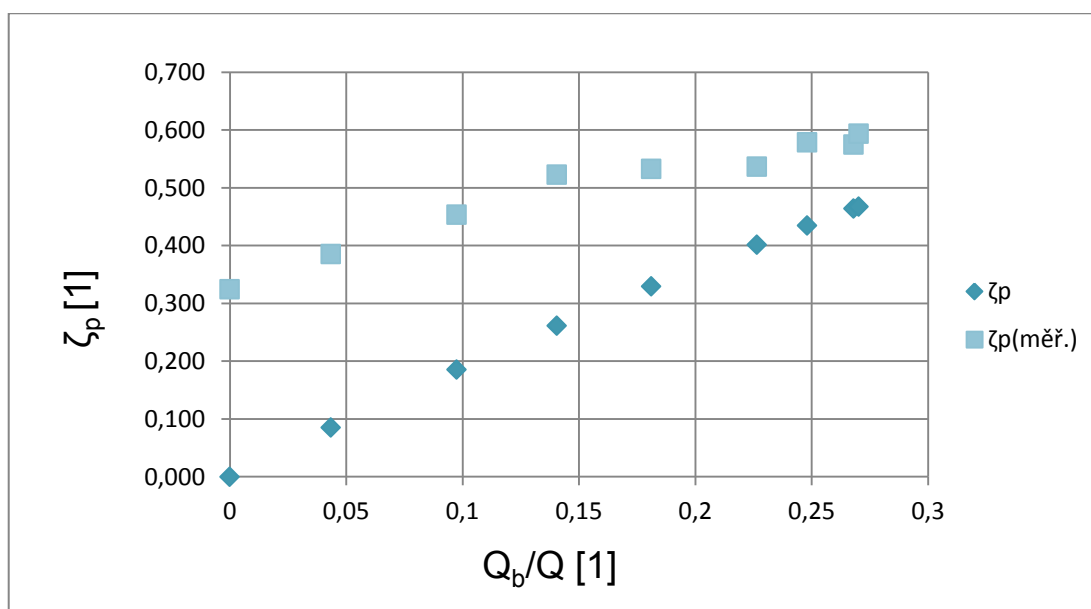
Tab. 7.4 – Hodnoty ztrátových součinitelů a poměry průtoků druhého měření

ζ_b	ζ_p	$\zeta_{b(\text{měř.})}$	$\zeta_{p(\text{měř.})}$	Q_b/Q
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
-1	0	-0,292	0,325	0
-0,828	0,085	-0,168	0,385	0,043
-0,620	0,185	-0,045	0,453	0,097
-0,458	0,261	0,102	0,523	0,141
-0,308	0,329	0,167	0,533	0,181
-0,145	0,402	0,245	0,537	0,226
-0,069	0,435	0,303	0,579	0,248
0,000	0,464	0,320	0,575	0,268
0,008	0,467	0,334	0,594	0,270



Obr. 7.3 – Graf závislosti ztrátových součinitelů boční větve na poměru průtoků pro druhé měření na první variantě měřící tratě

Z grafů (obr. 7.3) a (obr. 7.4) je patrný větší rozsah poměrů průtoků oproti ostatním měření. Hlavním faktorem způsobující tento stav je, že při měření byla zcela uzavřena jedna větev měřící tratě. Hodnoty ztrátových součinitelů na základě měření $\zeta_{b(\text{měř.})}$ a $\zeta_{p(\text{měř.})}$ se blíží teoretickým hodnotám, na rozdíl od prvního měření.



Obr. 7.4 – Graf závislosti ztrátových součinitelů přímé větve na poměru průtoků pro druhé měření na první variantě měřicí tratě

Graf závislosti (obr. 7.4) ztrátového součinitele ζ_p přímé větve na poměru průtoků Q_b/Q , je rozsahem hodnot naprosto totožný s rozsahem hodnot dle diagramu (obr. 4.8) s teoretickou křivkou pro úhel 90° .

Třetí a také poslední měření pro první variantu měřicí tratě, dle schématu (obr. 6.6) bylo obdobné jako měření druhé, s rozdílem otevření kohoutů pro větve (V_1) a (V_2). Kulový kohout (KK_2) větve (V_1) byl zcela otevřen, naopak kulový kohout (KK_3) větve (V_2) byl přiškrácen o přibližně 45° a postupně během měření otevírán.

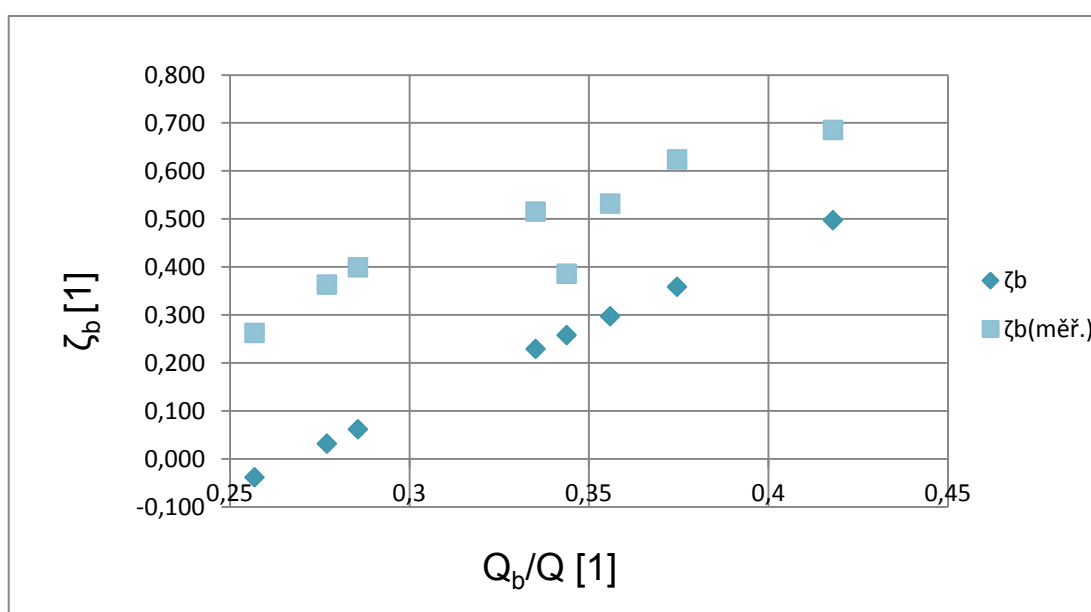
Měření a vyhodnocování hodnot probíhalo stejně jako v předchozích případech, bylo provedeno celkem osm měření. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zapsány v tabulkách (tab. 7.5) a (tab. 7.6).

Tab. 7.5 – Naměřené a počítané hodnoty třetího měření

Naměřené hodnoty					Počítané hodnoty			
Q_2	Q_3	h_1	h_2	h_3	Q_1	v_1	v_2	v_3
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
0,000242	0,000415	0,315	0,305	0,110	0,0001736	0,682	0,950	1,632
0,000281	0,000449	0,440	0,420	0,205	0,0001681	0,660	1,103	1,763
0,000300	0,000466	0,500	0,475	0,260	0,0001658	0,652	1,179	1,831
0,000319	0,000481	0,565	0,535	0,310	0,0001611	0,633	1,255	1,888
0,000344	0,000525	0,655	0,615	0,380	0,0001806	0,710	1,354	2,063
0,000378	0,000529	0,775	0,735	0,485	0,0001511	0,594	1,485	2,078
0,000400	0,000553	0,865	0,815	0,555	0,0001533	0,603	1,572	2,174
0,000419	0,000564	0,920	0,875	0,620	0,0001450	0,570	1,648	2,218

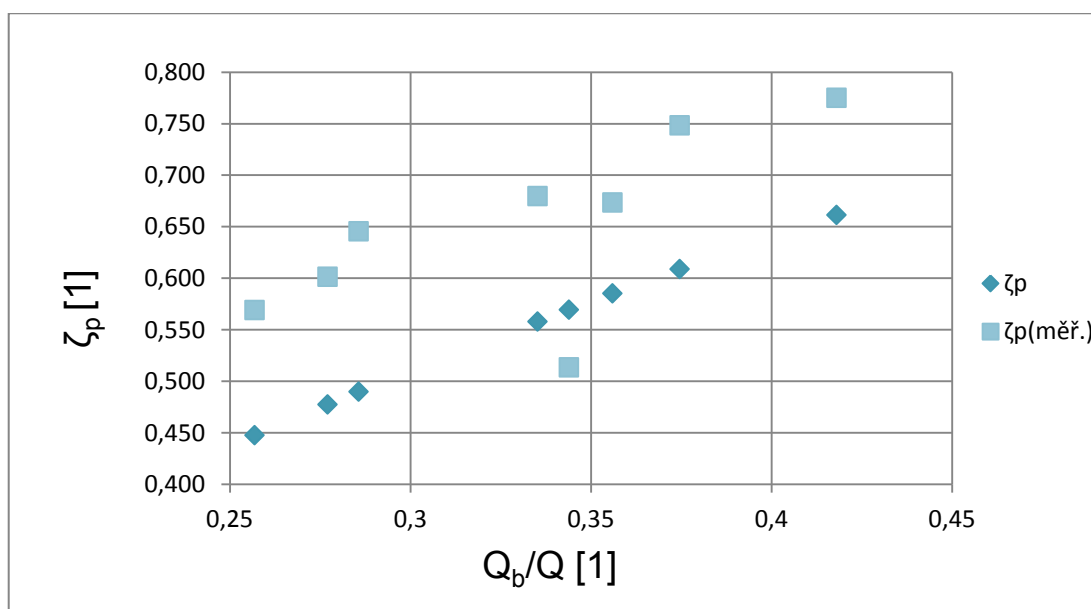
Tab. 7.6 – Hodnoty ztrátových součinitelů a poměry průtoků třetího měření

ζ_b	ζ_p	$\zeta_{b(\text{měř.})}$	$\zeta_{p(\text{měř.})}$	Q_b/Q
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
0,497	0,661	0,685	0,775	0,418
0,358	0,609	0,624	0,748	0,375
0,297	0,585	0,532	0,674	0,356
0,229	0,558	0,515	0,680	0,335
0,257	0,570	0,386	0,514	0,344
0,061	0,490	0,399	0,646	0,286
0,032	0,477	0,363	0,601	0,277
-0,038	0,448	0,262	0,569	0,257



Obr. 7.5 – Graf závislosti ztrátových součinitelů boční větve na poměru průtoků pro třetí měření na první variantě měřicí tratě

Na grafech (obr. 7.5) a (obr. 7.6) je znatelný podobný výsledek vyhodnocení ztrátových součinitelů jako v předchozích případech. Hodnoty ztrátových součinitelů se v obou grafech k sobě přibližují, podobně jak je tomu u druhého měření.



Obr. 7.6 – Graf závislosti ztrátových součinitelů přímé větve na poměru průtoků pro třetí měření na první variantě měřicí tratě

7.2 Vyhodnocení druhé varianty měřicí tratě

Měření na druhé variantě měřicí tratě probíhalo formou regulace průtoku pouze na jednom kulovém kohoutu a to na hlavním (KK_1), jak je zobrazeno na schématu (obr. 6.7). Hlavní kohout byl zcela otevřen a bylo prováděno jeho uzavírání po jednotlivých krocích. Zde již není možno regulovat průtok každé větve zvlášť.

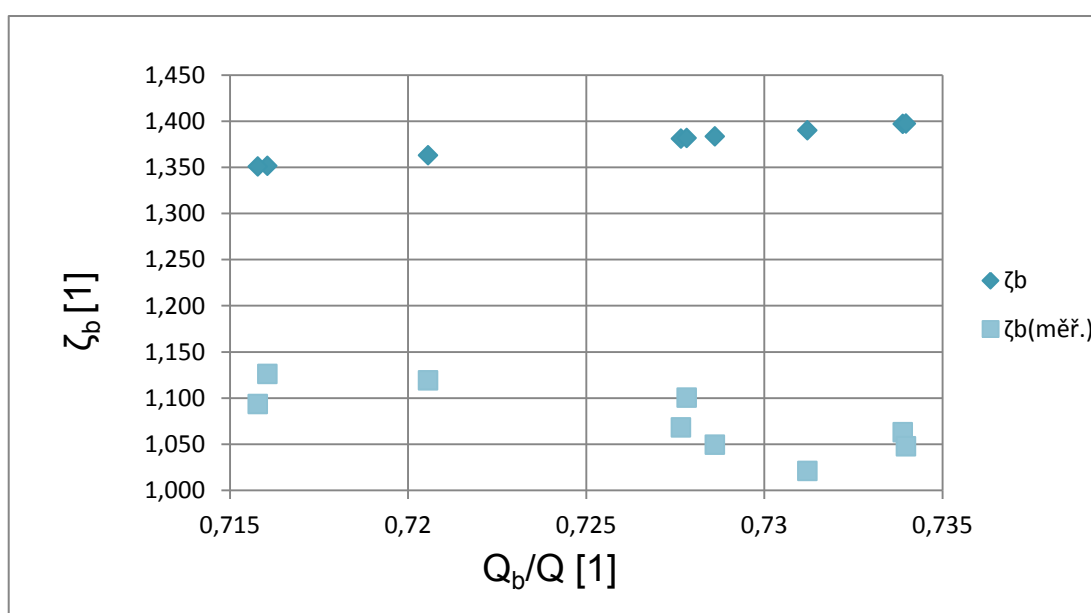
Měření a vyhodnocování probíhalo naprosto stejně jako v podkapitole 7.1. Bylo naměřeno celkem devět hodnot, které jsou spolu s jejich výpočty zapsány v tabulkách (tab. 7.7) a (tab. 7.8).

Tab. 7.7 – Naměřené a počítané hodnoty měření na druhé variantě měřicí tratě

Naměřené hodnoty					Počítané hodnoty			
Q_2	Q_3	h_1	h_2	h_3	Q_1	v_1	v_2	v_3
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	[m]	[m]	[m]	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
0,000139	0,000510	1,035	1,080	0,720	0,000371	1,46	0,546	2,004
0,000136	0,000506	0,995	1,040	0,695	0,000370	1,46	0,535	1,990
0,000132	0,000496	0,940	0,980	0,645	0,000364	1,43	0,519	1,949
0,000129	0,000486	0,885	0,935	0,605	0,000356	1,40	0,508	1,908
0,000128	0,000471	0,785	0,825	0,520	0,000343	1,35	0,502	1,850
0,000124	0,000454	0,705	0,745	0,450	0,000331	1,30	0,486	1,785
0,000121	0,000426	0,560	0,590	0,330	0,000305	1,20	0,475	1,672
0,000113	0,000396	0,410	0,435	0,215	0,000283	1,11	0,442	1,556
0,000104	0,000373	0,305	0,325	0,130	0,000269	1,06	0,409	1,465

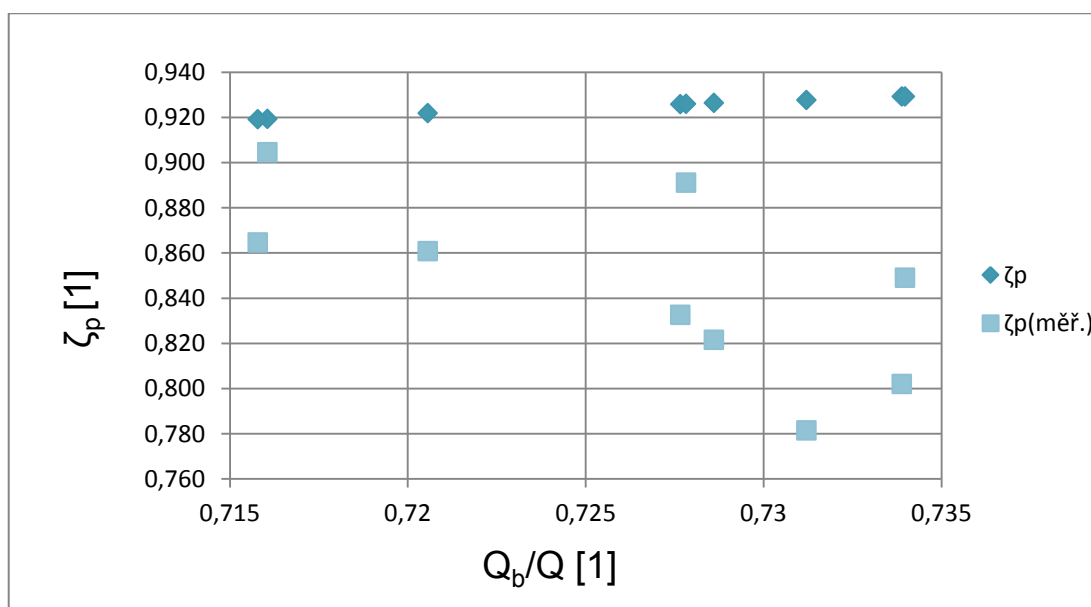
Tab. 7.8 – Hodnoty ztrátových součinitelů a poměry průtoků měření na druhé variantě měřicí tratě

ζ_b	ζ_p	$\zeta_{b(\text{měř.})}$	$\zeta_{p(\text{měř.})}$	Q_b/Q
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
1,38	0,926	1,07	0,833	0,728
1,39	0,928	1,02	0,782	0,731
1,40	0,929	1,06	0,802	0,734
1,40	0,929	1,05	0,849	0,734
1,38	0,926	1,05	0,822	0,729
1,38	0,926	1,10	0,891	0,728
1,35	0,919	1,13	0,905	0,716
1,35	0,919	1,09	0,865	0,716
1,36	0,922	1,12	0,861	0,721



Obr. 7.7 – Graf závislosti ztrátových součinitelů boční větve na poměru průtoků pro měření na druhé variantě měřicí tratě

Na grafech (obr. 7.7) a (obr. 7.8) lze zaznamenat obrat v hodnotách ztrátových součinitelů. U tohoto měření jsou hodnoty ztrátového součinitele přímé větve ζ_p menší než hodnoty ztrátového součinitele boční větve ζ_b , čímž se toto měření liší od předchozího. Zásadní rozdíl je mezi hodnotami ztrátových součinitelů teoretickými a na základě měření, kde hodnoty ζ_b a ζ_p jsou v tomto případě větší než hodnoty $\zeta_{b(\text{měř.})}$ a $\zeta_{p(\text{měř.})}$, naopak je tomu v předchozím měření. Další výraznou změnou je rozsah poměrů průtoků, který je v tomto měření minimální. Příčinou těchto rozdílů může být odebrání kulového kohoutu, což způsobí zmenšené ztrát v celém obvodu.



Obr. 7.8 – Graf závislosti ztrátových součinitelů přímé větve na poměru průtoků měření na druhé variantě měřicí tratě

7.3 Vyhodnocení třetí varianty měřicí tratě

Měření na třetí variantě měřicí tratě se liší zapojením od přechozích variant, jak je možno vidět na schématu (obr. 6.8). Proudý z větví (V_1) a (V_2) se spojují v T-kusu proti sobě a výstupní větví je pro tento případ boční přípojka, jak je již uvedeno v podkapitole 4.2.

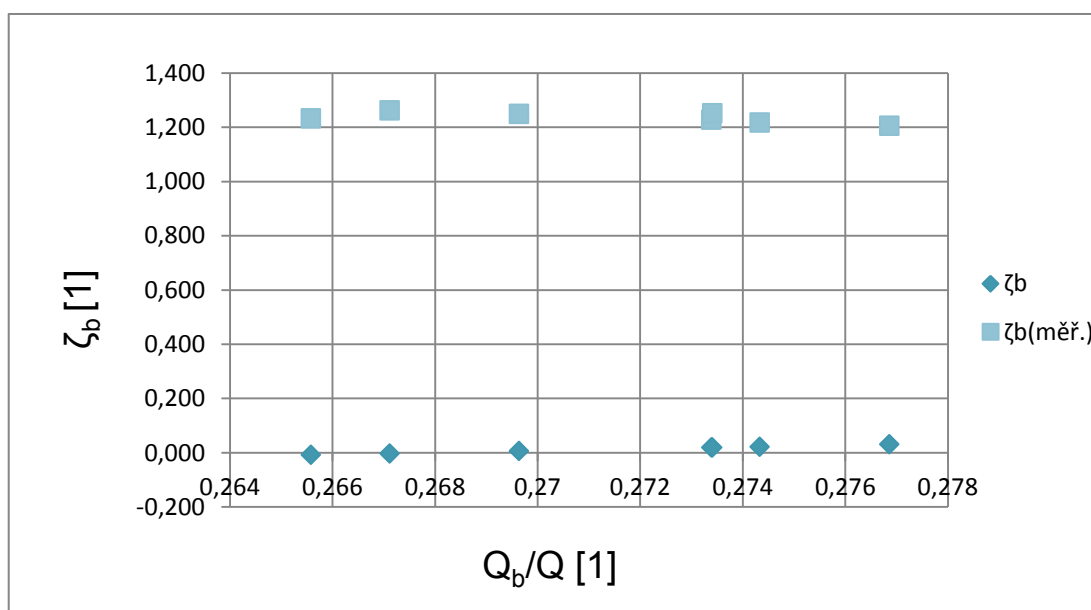
Měření probíhalo stejně jako u druhé varianty měřicí tratě, kdy byl hlavní kulový kohout (KK_1) otevřen a bylo prováděno jeho zavírání po jednotlivých krocích. Výpočty pobíhaly naprosto stejně, jak je uvedeno v předchozích kapitolách. Celkem bylo naměřeno sedm hodnot, které jsou zapsány v tabulkách (tab. 7.9) a (tab. 7.10).

Tab. 7.9 – Naměřené a počítané hodnoty měření na třetí variantě měřicí tratě

Naměřené hodnoty					Počítané hodnoty			
Q_2	Q_3	h_1	h_2	h_3	Q_1	v_1	v_2	v_3
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	[m]	[m]	[m]	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
0,000140	0,000507	1,045	1,070	0,705	0,000366	1,440	0,551	1,991
0,000135	0,000493	0,965	0,990	0,640	0,000358	1,407	0,529	1,936
0,000129	0,000471	0,840	0,865	0,545	0,000342	1,343	0,508	1,850
0,000121	0,000442	0,675	0,695	0,410	0,000321	1,262	0,475	1,737
0,000113	0,000417	0,540	0,560	0,305	0,000305	1,197	0,442	1,640
0,000104	0,000392	0,410	0,430	0,205	0,000288	1,132	0,409	1,541
0,000099	0,000369	0,310	0,320	0,125	0,000271	1,063	0,388	1,451

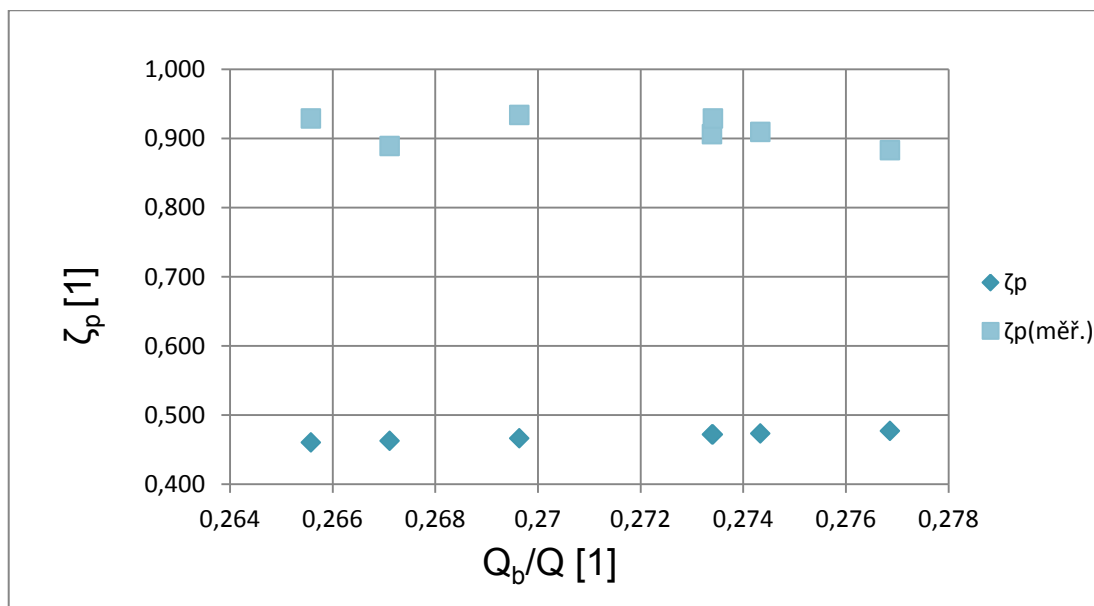
Tab. 7.10 – Hodnoty ztrátových součinitelů a poměry průtoků měření na třetí variantě měřicí tratě

ζ_b	ζ_p	$\zeta_{b(\text{měř.})}$	$\zeta_{p(\text{měř.})}$	Q_b/Q
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
0,03	0,477	1,206	0,883	0,277
0,02	0,472	1,228	0,906	0,273
0,02	0,473	1,217	0,909	0,274
0,02	0,472	1,252	0,929	0,273
0,01	0,467	1,249	0,934	0,270
-0,01	0,461	1,232	0,929	0,266
0,00	0,463	1,262	0,889	0,267



Obr. 7.9 – Graf závislosti ztrátových součinitelů boční větve na poměru průtoků pro měření na třetí variantě měřicí tratě

Z grafů (obr. 7.9) a (obr. 7.10) je patrné, že závislost mezi ztrátovými součiniteli ζ_b , ζ_p a poměrem průtoků Q_b/Q je přímkového charakteru a to lze říci i o ztrátových součinitelích měření $\zeta_{b(\text{měř.})}$ a $\zeta_{p(\text{měř.})}$, jejichž závislost na poměru průtoků je prakticky téměř konstantní. Výrazný rozdíl je mezi hodnotami ztrátových součinitelů teoretickými, kde hodnoty ζ_p jsou výrazně vyšší než hodnoty ζ_b . U tohoto měření bylo docíleno opět minimální ho rozsahu poměrů průtoků.



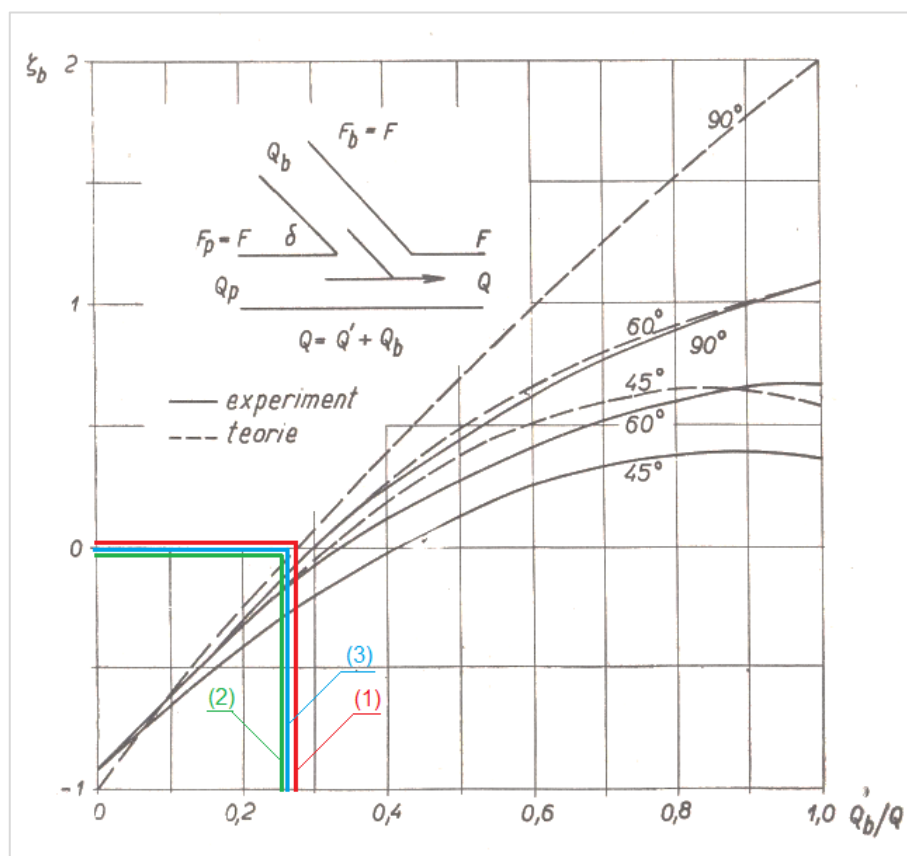
Obr. 7.10 – Graf závislosti ztrátových součinitelů přímé větve na poměru průtoků pro měření na třetí variantě měřicí tratě

8. Porovnání naměřených a vypočtených hodnot

V první fázi se jedná o porovnání vypočtených hodnot ztrátových součinitelů z teoretického hlediska. K porovnání jsem zvolil literaturu Hydraulika průmyslových armatur od autorů V. Koláře a S. Vinopala [3], ze které jsem čerpal vztahy pro výpočet ztrátových součinitelů ζ_b a ζ_p a ve které jsou vyhodnoceny podobná měření ztrátových součinitelů na tvarovce typu T.

Jako příklad k porovnání jsem zvolil první, střední a konečnou naměřenou hodnotu z tabulky (tab. 7.2) prvního měření na prvním typu zapojení měřící tratě. První hodnoty ztrátových součinitelů boční a přímé větve jsou $\zeta_{b(1)} = 0,01123$ a $\zeta_{p(1)} = 0,469$, druhé vypočtené hodnoty jsou $\zeta_{b(2)} = -0,03428$ a $\zeta_{p(2)} = 0,45$ a třetími hodnotami jsou $\zeta_{b(3)} = -0,00216$ a $\zeta_{p(3)} = 0,463$. Veškeré tyto hodnoty budou porovnány graficky v závislosti na poměrech průtoků, a tedy pro první hodnoty platí, že $\frac{Q_{b(1)}}{Q} = 0,271$, pro druhou hodnotu $\frac{Q_{b(2)}}{Q} = 0,258$ a pro třetí hodnotu $\frac{Q_{b(3)}}{Q} = 0,267$.

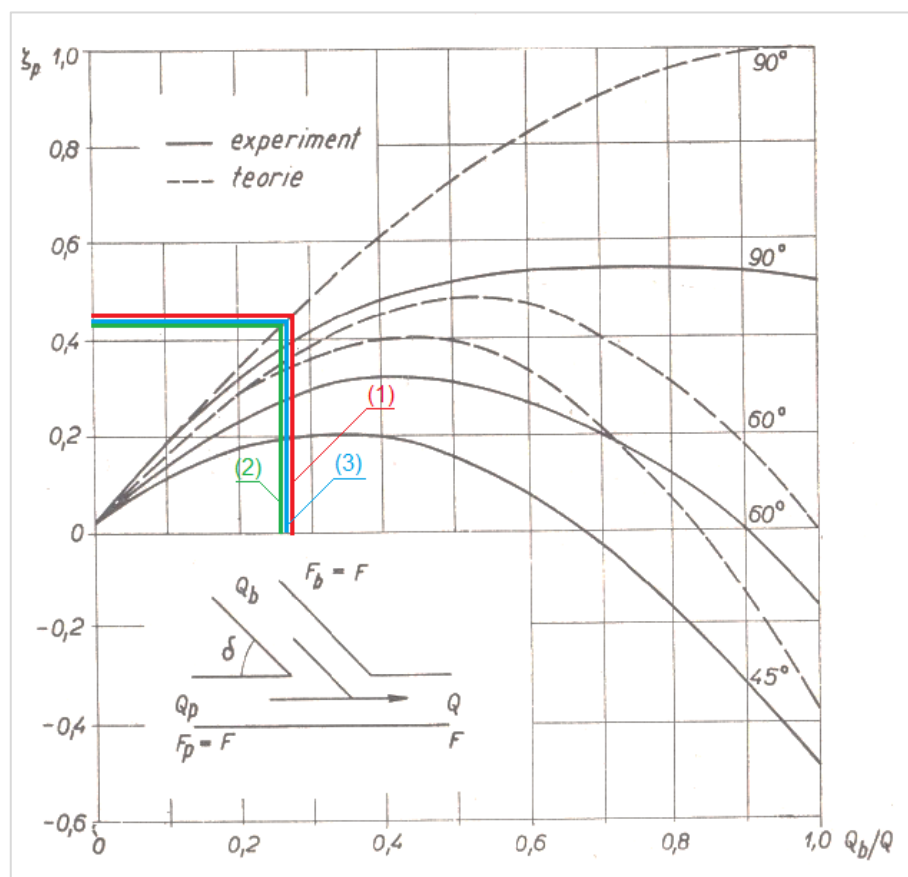
K porovnání lze použít diagram z literatury [3], který je rovněž obsažen v podkapitole 4.2. Následující diagram je určen pro ztrátový součinitel boční větve ζ_b .



Obr. 8.1 – Diagram znázorňující závislost ztrátového součinitele boční větve na poměru průtoků pro různé úhly naklonění sací přípojky [3]

Dle diagramu (obr. 8.1) lze říci, že veškeré hodnoty se přibližně shodují s teoretickou křivkou pro tvarovku s úhlem boční větve 90° . Vynesené hodnoty jsou označeny čísly v závorkách tak, jak jsou označené ztrátové součinitele a poměry průtoků.

Pro porovnání ztrátového součinitele přímé větve je nutno použít odlišný diagram než pro ztrátového součinitele boční větve. Následující diagram je určen pro ztrátový součinitel přímé větve ζ_p , který je rovněž obsažen v podkapitole 4.2.



Obr. 8.2 – Diagram znázorňující závislost ztrátového součinitele přímé větve na poměru průtoků pro různé úhly naklonění sací přípojky [3]

Podle diagramu (obr. 8.2) můžeme říci, že vynesené hodnoty, které jsou označeny čísly v závorkách, jsou přibližně shodné s teoretickou křivkou pro tvarovku typu T s úhlem boční větve 90° .

Na obou diagramech (obr. 8.1) a (obr. 8.2) jsou průřezy obou větví označeny písmenem F a jsou shodné, což rovněž platí pro měřenou tvarovku.

V druhé fázi se jedná o porovnání vypočtených hodnot z teoretického hlediska, s hodnotami vypočtenými na základě měření na experimentálních tratích. K výpočtu hodnot na základě měření jsem využil vztahy z literatury Internal flow systems 2nd edition od autora D. S. Millera [10]. Porovnání těchto hodnot je podrobně popsáno v kapitole 7, kde pro přehlednost jsou hodnoty všech ztrátových součinitelů vyneseny do grafů.

9. Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo změřit a vyhodnotit hydraulické ztráty na T-kusu při změnách směru proudění na předem navržené experimentální měřící trati. Byly navrženy celkem tři experimentální měřící tratě, na kterých proběhlo celkově pět měření. Byly změřeny objemové průtoky ve dvou místech a to celkový objemový průtok tratě a objemový průtok na jedné z větví tvarovky typu T. Další měřenou veličinou byly tlakové výšky pomocí U-trubice, na každém ze vstupů do tvarovky. Odběrná místa (celkem tři) pro měření tlakových výšek, byla umístěna přibližně 0,2 m od okrajů tvarovky. Objemové průtoky a tlakové výšky byly nezbytnou součástí pro vyhodnocování ztrát, konkrétně pro výpočty ztrátových součinitelů.

Na první navržené experimentální trati (obr. 6.6) proběhly celkem tři měření. První měření probíhalo způsobem, kdy byly otevřeny všechny kulové kohouty, a po krocích byl přiškrcován hlavní kulový kohout. Bylo naměřeno celkem jedenáct hodnot objemových průtoků a výšek hladin v U-trubici. Druhé měření probíhalo za stavu otevřených všech kulových kohoutů, krom kohoutu větve (V_1) dle schématu (obr. 6.6), který byl zcela uzavřen a po krocích otevírán. Zde bylo naměřeno celkem devět hodnot. Třetí měření na první experimentální trati probíhalo obdobně jako druhé s rozdílem, kdy byly otevřeny všechny kulové kohouty s výjimkou kohoutu větve (V_2), který byl přiškrcen o 45° a po krocích otevírán. Během třetího měření bylo zapsáno osm hodnot.

Druhá experimentální měřící trať (obr. 6.7) byla navržena v důsledku snížení možných ztrát vlivem velkého počtu kulových kohoutů. Počet kulových kohoutů byl snížen na dva kusy a to hlavní a jeden vedlejší. Na této experimentální trati již nebylo možné regulovat objemové průtoky na každé z větví zvlášť. Na této trati bylo provedeno jedno měření způsobem, kdy byl otevřen hlavní kulový kohout a postupně během měření uzavírán. Bylo naměřeno celkem devět hodnot objemových průtoků a výšek hladin v U-trubici.

Poslední navržená experimentální trať se podobá druhé variantě, s rozdílem spojení proudu v tvarovce T, kdy u této varianty vedou proudy proti sobě, jak je možné vidět na schématu (obr. 6.8). Měření na této variantě měřící tratě probíhalo naprosto shodně s druhou variantou, kdy byl zcela otevřen hlavní kulový kohout a bylo prováděno jeho zavírání. Celkem bylo naměřeno sedm hodnot objemových průtoků a výšek hladin v U-trubici.

U každé z variant experimentálních měřících tratí byl dopočítán objemový průtok zbývajících větví z rozdílu dvou naměřených objemových průtoků a velikosti rychlosti proudění v jednotlivých větvích. Všechny hodnoty jak naměřené, tak počítané byly zapsány do tabulek.

Pro určení ztrátových součinitelů z teoretického hlediska byly využity vztahy (4.4) a (4.5) dle literatury [3] a pro výpočet ztrátových součinitelů na základě naměřených hodnot na experimentální trati byly využity vztahy (5.3) a (5.4) dle literatury [10], pro každou větev zvlášť. Vypočítané hodnoty ztrátových součinitelů pomocí těchto vztahů byly zapsány do tabulek a vyneseny do grafů pro následné porovnání.

Pro příklad porovnání hodnot teoretických ztrátových součinitelů byla použita literatura Hydraulika průmyslových armatur od autorů V. Koláře a S. Vinopala [3], ve které se autoři zabývají podobnou problematikou. Z prvního měření na první variantě experimentální měřicí tratě byly vybrány tři hodnoty k porovnání. Tyto hodnoty byly vyneseny do diagramů (obr. 8.1) a (obr. 8.2) viz kapitola 8. Vybrané hodnoty jsou podobné s hodnotami v diagramech konkrétně s teoretickou křivkou pro odbočku pod úhlem 90° .

Následně byly porovnány hodnoty teoretických ztrátových součinitelů s hodnotami ztrátových součinitelů na základě experimentálního měření. Tyto hodnoty byly pro lepší přehlednost vyneseny do grafů a následně porovnány, viz kapitola 7. Mezi teoretickými ztrátovými součiniteli a ztrátovými součiniteli na základě měření je značný rozdíl. V některých případech měření se hodnoty k sobě přibližují, v jiných případech jsou odlišné. Příčinou může být nedokonalost sestavené experimentální měřicí tratě, kde vliv na ztráty má především lepení měřeného T-kusu, kdy nejsme schopni zajistit ideálně hladký vnitřní povrch přechodových oblastí, zatímco v literárních zdrojích je uvažováno s hladkým povrchem. Dalším vlivem může být velký počet kulových kohoutů v celém měřeném obvodu.

Bakalářská práce může být vhodným materiálem pro řešení laboratorních úloh z předmětu mechanika tekutin.

Použitá literatura

- [1] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. SNTL. Praha 1987, 354 s.
- [2] JANALÍK, J., ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. VŠB-TU Ostrava, 123 s.
<http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-Mechanikatekutin.pdf>
- [3] KOLÁŘ, V., VINOPAL, S. *Hydraulika průmyslových armatur*. SNTL. Praha 1963, 650 s.
- [4] JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta VŠB-TU Ostrava. 1995, 155 s.
- [5] JENČÍK, J., KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. SNTL. Praha 1982, 580 s.
- [6] NOSKIEVIČ, J. JANALÍK, J. RÝC, Z. ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin příručka pro laboratorní cvičení*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1987, 152 s. ISBN-80-03-00308-3.
- [7] KADLEC, K. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1). *Automa*. [online]. 2007, ročník 50, číslo 2.
<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au020728.pdf>
- [8] LÁTAL, F. Bourdonova trubice. *Pokusy z fyziky*. [online]. 2012.
<http://pokusy.upol.cz/skolni-pokusy/mechanika/vyveva/bourdonova-trubice-24/>
- [9] SMOLEK, J. Měření tlaku – Tlakoměry deformační pístové a jiné. *Měření fyzikálních a technických veličin*. [online]. 2012.
http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_22-06.pdf
- [10] MILLER, D., S. *Internal flow systems 2nd edition*. 1978, 396 s. ISBN-0-947711-77-5